



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS
INSTITUTO DE FÍSICA

**“MEDICIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA
RADIACIÓN EN FAMILIARES DE PACIENTES
TRATADOS CON ^{131}I POR PATOLOGÍA
TIROIDEA”**

TESIS

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

PRESENTA:

YIRA TATIANA RAMÍREZ GARZÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. OLGA LETICIA ÁVILA AGUIRRE

COMITÉ TUTORAL

DR. LUIS ALBERTO MEDINA VELÁZQUEZ

DRA. MARÍA ISABEL GAMBOA DE BUEN

DR. ENRIQUE ESTRADA LOBATO





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

MÉXICO D.F., DICIEMBRE, 2011

*A mi mama, quien además de darme la vida,
me ayuda a construir y realizar cada sueño*

Agradecimientos

Son muchas las personas e instituciones que han participado en este trabajo y a quienes quiero expresar mi gratitud por el apoyo y la confianza que me han prestado.

A mi Tutora Principal, Dra. Olga Leticia Ávila Aguirre, quien con su conocimiento, paciencia, incentivos y asesoría, hizo posible el pleno desarrollo de este trabajo. Además agradezco que más que una tutora fue una gran amiga, incondicional durante toda la maestría llegando a ser un apoyo tanto académico como personal.

A los miembros del Comité Tutor: Dra. María Isabel Gamboa de Buen, Dr. Luis Alberto Medina Velázquez, Dr. Enrique Estrada Lobato, por sus importantes críticas durante toda la elaboración de mi trabajo de tesis.

A los miembros del comité sinodal: Dr. Miguel Ángel Ávila Rodríguez, Dra. Olga Leticia Ávila Aguirre, Dr. Enrique Estrada Lobato, M. en C. Flavio Ernesto Trujillo Zamudio y M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos por el tiempo dedicado a la revisión de mi tesis y por sus valiosos comentarios.

A la Dra. María Ester Brandan por su sabiduría, comprensión, disposición y total apoyo. Además de ser un ícono de gran admiración y así un constante ejemplo motivador durante toda la duración en que cursé la maestría.

Al Dr. Enrique Estrada Lobato, por permitirme desarrollar mi tesis en el Departamento de Medicina Nuclear del INCan, por su respaldo y acertados consejos.

Al M en C. Alejandro Rodríguez Laguna por sus múltiples comentarios, enseñanzas, respaldo incondicional durante las actividades realizadas en el INCan y sobre todo por su amistad.

A la M. en C. Ana Elena Buenfil por sus enseñanzas, disposición y la supervisión de

todos los procedimientos realizados en el laboratorio de dosimetría del IFUNAM.

Al M en C. Cesar Gustavo Ruiz Trejo por su constante disponibilidad y asesoría en muchos de los temas de esta tesis.

Al ININ, al INCan y a la UNAM por apoyarme y permitirme hacer uso de sus instalaciones para la realización de mi trabajo.

Al personal del Laboratorio de Metrología, ININ, por su apoyo para las medidas de calibración.

Al personal del Departamento de Medicina Nuclear del INCan por su constante apoyo durante el tiempo en que se llevaron a cabo los estudios.

A Yanalte Herrero, por su amabilidad y atención desde el primer momento en que quise ingresar al Posgrado en Ciencias Físicas de la UNAM. Su ayuda para tramitar mi permanencia en este país durante todo el tiempo en que llevé los cursos y desarrollé el trabajo de tesis de la maestría fue imprescindible.

A todos los maestros y a los compañeros de la maestría, por sus innumerables enseñanzas y momentos compartidos.

A todos mis amigos, sin excluir a ninguno, pero en especial a Diego, Arturo, Eduardo, Oscar, Diego Cueva, Itzel, Jenri, Noel, Marcos, Osvaldo con los cuales he compartido innumerables malos y buenos momentos, gracias por aguantarme, escucharme y brindarme su incondicional amistad.

Al apoyo 336089/235800 de CONACYT, a PAEP-UNAM y al proyecto PAPIIT-UNAM IN-102610 por el apoyo económico brindado durante el tiempo de duración de la maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme desarrollar académicamente, crecer como persona y ser parte de su prestigiosa e importante comunidad.

A Dios, a mi mamá por su paciencia, por entender mis ausencias y malos momentos, por sus sabios consejos y apoyo incondicional a pesar de la distancia.

A todos debo más que un simple “Gracias”, pues hicieron de mi estancia en este país un gran e inmemorable suceso en mi vida, al punto que hoy siento tener una segunda casa llena de personas increíbles.

Índice General

Introducción	1
Capítulo 1. Conceptos Básicos	7
1. Glándula tiroides	7
1.1.1. Anatomía y fisiología básica	7
1.1.1.1. Control de liberación de las hormonas tiroideas	9
1.1.1.2. Síntesis de hormonas tiroideas	10
1.2. Cáncer de tiroides	11
1.2.1. Cáncer diferenciado de tiroides	12
1.2.1.1. Carcinoma papilar de tiroides	12
1.2.2. Carcinoma folicular de tiroides	14
1.2.3. Tratamiento para el cáncer diferenciado de tiroides	14
1.2.3.1. Esquemas de dosis ablativas con ¹³¹ I	15
1.2.3.2. Control de la evolución	16
1.2.3.3. Metas del tratamiento con ¹³¹ I	16
1.3. Dosimetría termoluminiscente	16
1.3.1. Sulfato de calcio: CaSO ₄ :Dy (DTL-900)	19
1.4. Protección radiológica	20
1.4.1. Cantidades físicas básicas	21
1.4.1.1. Relación entre las magnitudes dosis y kerma	23
1.4.1.2. Relación entre exposición y kerma	24
1.4.1.3. Relación entre dosis y exposición	24
1.4.2. Magnitudes de protección	25
1.4.2.1. Dosis equivalente	25
1.4.2.2. Dosis efectiva	26

1.4.3.	Magnitudes operativas	27
1.4.4.	Categorías de exposición	27
1.4.4.1.	Exposición ocupacional	28
1.4.4.2.	Exposición del público	28
1.4.4.3.	Exposición médica de pacientes	28
1.4.5.	Principios de protección radiológica	29
1.4.6.	Limites de dosis	29
1.5.	Protección radiológica de pacientes tratados con radionúclidos	30
1.5.1.	Egreso de pacientes tratados con radionúclidos	31
1.5.1.1.	Normativa vigente en México	31
1.5.1.2.	Recomendaciones internacionales	32
Capítulo 2. Metodología		33
2.1.	Equipos y materiales	33
2.1.1.	Dosímetros termoluminiscentes	33
2.1.1.1.	Tratamientos térmicos	34
2.1.1.2.	Lectura de los DTL	34
2.1.1.3.	Caracterización de los DTL	36
2.1.1.4.	Calibración de los DTL	37
2.2.	Evaluación de la dosis recibida por los familiares al cuidado de pacientes tratados con ¹³¹ I	38
2.2.1.	Medición mediante dosimetría termoluminiscente	38
2.2.2.	Cálculos teóricos	39
2.2.3.	Factores de ocupación	43
2.2.4.	Clasificación socioeconómica de los familiares	44
2.3.	Contribución a la dosis externa recibida por los pacientes a causa de las condiciones de hospitalización	45
Capítulo 3. Resultados y discusión		47
3.1.	Homogeneidad de los DTL	47
3.2.	Reproducibilidad de los DTL	48
3.3.	Calibración de los DTL	48
3.4.	Dosis efectiva recibida por familiares al cuidado de pacientes con CDT	50
3.4.1.	Dosis efectiva recibida por los familiares en función de las condiciones socioeconómicas	54

3.4.2. Dosis efectiva recibida por los familiares en función de la actividad administrada al paciente	56
3.4.3. Análisis estadístico de los resultados	58
3.5. Cálculos teóricos de las dosis efectivas recibidas por los familiares al cuidado de los pacientes	60
3.6. Dosis externa recibida por un paciente en el cuarto de hospitalización	62
Capítulo 4. Conclusiones	65
Referencias	68
Apéndice A. Esquema de decaimiento y propiedades del ¹³¹ I.	74
Apéndice B. Instrucciones de Protección Radiológica al paciente tras la administración de una terapia con ¹³¹ I.	75
Apéndice C. Encuesta realizada a los familiares para su clasificación, de acuerdo con las condiciones socio-económicas y de transporte.	77
Apéndice D. Caracterización de los dosímetros termoluminiscentes	80

Introducción

Los carcinomas tiroideos son la patología más común entre las enfermedades malignas endocrinológicas, su incidencia en diversas partes del mundo varía de 1 a 10 casos por cada 100 000 habitantes [IAEA 09]. Dentro de estas patologías predomina la incidencia del cáncer diferenciado de tiroides (CDT) con un 98% [CA 04], el cual se define como un carcinoma derivado del epitelio folicular que conserva características biológicas básicas del tejido tiroideo sano [HO 04].

El CDT tiene un excelente pronóstico cuando se administra el tratamiento apropiado. La tasa de supervivencia a los 10 años en casos de metástasis a distancia es aproximadamente del 25 al 40% y con causa específica es cercana al 85% [LU 08]. Aunque el tratamiento más usado para el CDT es la escisión quirúrgica completa del tumor [CA 04] existen muchas controversias en relación al manejo adecuado de algunos aspectos como son la extensión de la escisión, la ablación con yodo radioactivo y la modalidad de egreso del hospital del paciente.

El uso de ^{131}I para afecciones tiroideas se fundamenta en la captación del yodo por parte del tejido tiroideo normal. En el caso específico de ablación con ^{131}I para pacientes con CDT, se busca eliminar todo el tejido remanente después de una cirugía, así como disminuir cualquier posible actividad de metástasis tiroidea en el cuerpo; pudiéndose lograr solo a causa de que las células tumorales de esta patología conservan las funciones de las células normales, como se describirá en el capítulo 1.

Aunque los pacientes son altamente beneficiados con esta modalidad de tratamiento, dado que el ^{131}I es un emisor de partículas beta y radiación gamma de alta energía las

personas que presenten proximidad con ellos durante el tratamiento con el radionúclido, estarán expuestas a irradiaciones indeseables y/o contaminaciones. Esto significa que es necesario tomar precauciones en materia de Protección Radiológica para prevenir la irradiación indeseada de las personas con las que interactúa el paciente durante su tratamiento.

La mayor contribución de irradiación a los miembros del público, familiares y cuidadores, a causa de la administración de ^{131}I es la radiación externa; sin embargo, también existe la posibilidad de contaminación, dado que el yodo radioactivo es exhalado en una mínima cantidad, siendo su forma principal de excreción la orina y en pequeñas cantidades a través de la saliva, sudor y heces.

La actividad retenida en el paciente es función de muchos factores como la actividad inicial administrada del radiofármaco, la presencia o ausencia de la glándula tiroides y la función renal, siendo muy variable la vida media biológica del ^{131}I dependiendo de cada paciente. En el 2001 Driver y Parker [DR 01] midieron la actividad de 174 pacientes en tratamiento con radioyodo para CDT, encontrando que aproximadamente el 55% de la actividad administrada es excretada en las primeras 24 horas siguientes al tratamiento, 22% en el segundo periodo de 24 horas y el 6 % en el tercer periodo de 24 horas, para un total del 85% descargado al sistema de desagüe durante los primeros 5 días.

A nivel mundial se han publicado reportes sobre la dosis que reciben los familiares al cuidado de pacientes tratados con ^{131}I , los cuales muestran que los principales factores de variabilidad en su valor, recaen en el estilo de vida y las condiciones socioeconómicas de cada paciente, que varían sustancialmente de país a país [PA 06a] [BA 99] [JA 78] [USNRC, 97] [MA 99a] [OL 08]. Por esta razón, es relevante conocer la situación de la población mexicana, lo que permitirá la elaboración de un reporte que aporte un referente de los valores de la dosis recibida por personas en proximidad con pacientes tratados con ^{131}I , bajo condiciones socio-económicas similares; siendo ésta la motivación principal de este trabajo. A su vez, este reporte permitirá analizar el riesgo radiológico que representa el paciente para las personas de su entorno como son el personal ocupacionalmente expuesto del hospital, sus familiares y el público en general.

La modalidad de egreso de pacientes tratados con ^{131}I , es otro de los aspectos controversiales dentro del tratamiento para pacientes con CDT, pues a nivel internacional no está estandarizada, siendo elección de cada país. La normatividad vigente en México [NOM, 09] sigue los lineamientos recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) en su publicación 26 [ICRP 77]. Estos lineamientos norman la salida del hospital cuando la actividad retenida es menor a 1.11 GBq (30 mCi) o cuando la tasa de exposición a 1 metro de distancia es menor a 5 mR/h, debiendo ser hospitalizados todos los pacientes tratados con ^{131}I para CDT.

En el año 2010 el Organismo Internacional de Energía Atómica, (IAEA por sus siglas en inglés) emitió un documento [IAEA 10] en el que recomienda que el egreso de pacientes del hospital se realice de acuerdo con lo que se denomina modalidad individual. Esta modalidad toma en cuenta las circunstancias particulares de cada paciente; es decir que en algunos casos lo más adecuado será permanecer en el hospital los primeros días tras la administración del ^{131}I , por ejemplo cuando hay presencia constante de niños o cuando no hay posibilidad de aislamiento en su casa y en otros, salir inmediatamente del hospital después de recibir el tratamiento, involucrando principalmente a aquellos pacientes que tienen las facilidades de aislarse unos días en su domicilio.

Sin embargo, la mayor preocupación en el uso de la modalidad de egreso individual es aumentar la dosis recibida por los familiares a cargo del cuidado de los pacientes durante su tratamiento con ^{131}I . Mathieu et al. [MA 99a] en un estudio realizado en Bélgica, reporto que la dosis recibida por el acompañante de pacientes tratados con actividades que van de 3700 a 7400 MBq (100-200 mCi) para CDT, durante un periodo de 15 días después de 2 d de hospitalización, tiene una media de 0.24 mSv para pacientes que no adoptan dormir en cama separadas y 0.17 mSv para pacientes que duermen en camas separadas. Con aproximaciones teóricas Coover *et al.* [CO 00] reportan que bajo algunas modificaciones temporales en el estilo de vida de los pacientes con CDT, éstos pueden ser egresados del hospital inmediatamente después de la administración del ^{131}I .

En conformidad con los resultados de investigaciones hechas alrededor del mundo, la ICRP [ICRP 04] ha planteado algunos aspectos que deben ser considerados para la decisión de liberar u hospitalizar un paciente, además de la actividad retenida:

- La hospitalización reduce la exposición al público y familiares, pero incrementa la exposición al personal ocupacionalmente expuesto (POE) y a su vez puede resultar en significativos costos monetarios que deben ser analizados y justificados.
- En el hospital la orina puede ser colectada y almacenada para reducir la radioactividad en el sistema de desagüe. Sin embargo, de acuerdo con una gran variedad de estudios esta práctica es considerada innecesaria y costosa, pues no se han encontrado medidas que indiquen un efecto potencial.
- Pacientes con enfermedades graves, como metástasis generalizada, que sean medicamente inestables.
- Pacientes mentalmente incompetentes y/o con incontinencia, que son incapaces de seguir las instrucciones y precauciones de seguridad radiológica.
- Situaciones en la casa donde se pueda presentar cercanía con infantes, niños o mujeres en embarazo, debido a constricciones físicas y sociales.

Esta última consideración es de suma importancia para la inducción de cáncer de tiroides, dado que la glándula tiroides de personas menores a los 15 años es más radiosensible que la de los adultos. De acuerdo con la publicación 94 [ICRP 04], la probabilidad de inducción a cáncer por cada mSv en adultos es de aproximadamente 0.005% y en niños de 0.01 a 0.02%.

En relación a la exposición del POE desde los pacientes con CDT tratados con ^{131}I , en 1996, Barrington *et al.* [BA 96b] calcularon la dosis recibida por las enfermeras al cuidado de los pacientes con CDT, durante los 7 días seguidos a la terapia con radioyodo, encontrando que la dosis acumulada por la enfermera debida a su cercanía con un paciente encamado podía variar desde 1.0 a 4.2 mSv dependiendo de la actividad suministrada, mientras que los valores de dosis debidos al trato con pacientes egresados inmediatamente después de la administración del ^{131}I (ambulatorios) fueron de 0.08 a 0.33 mSv.

Todas las consideraciones y valores que se mostraron previamente en relación a las exposiciones a las que se ven sometidos tanto POE como público general, a causa de los pacientes con CDT tratados con ^{131}I , conducen a valorar la pertinencia de la normativa vigente en México [NOM 09] o sustentar futuras modificaciones considerando las nuevas recomendaciones de la IAEA [IAEA 10]. Este trabajo se enfoca en la obtención de datos relativos a las dosis recibidas por los familiares de los pacientes con CDT del Departamento de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Cancerología (INCan) tratados con ^{131}I , usando dosímetros termoluminiscentes, los cuales han sido generalmente aceptados como el método más adecuado y confiable de dosimetría personal [YA 02].

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Caracterizar el lote de dosímetros TLD-900 usado para las medidas.
2. Medir la respuesta termoluminiscente de dosímetros portados por familiares al cuidado del paciente y a partir de ella evaluar la dosis efectiva.
3. Verificar que los resultados obtenidos estén dentro de lo establecido por el sistema de limitación de dosis y valorar la pertinencia de la normativa de egreso vigente.
4. Evaluar la dosis efectiva a partir de estimaciones teóricas considerando una fuente puntual e información sobre tiempos y distancias de cercanía al paciente proporcionada por los participantes.

En relación al contenido de este trabajo, esta constituido por 4 capítulos. En el capítulo 1 se da una descripción de la anatomía y fisiología básica de la glándula tiroides, destacando como su neoplasia endocrina más común el cáncer de tiroides, el cual se clasifica de acuerdo con su histología en los cánceres producidos de las células parafoliculares y los producidos de las células foliculares. Dentro de este últimos grupo se destaca por su incidencia el CDT, que a su vez es dividido en *el carcinoma papilar y el carcinoma folicular*, para el que se da la descripción del tratamiento con ^{131}I , que se realiza en el departamento de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Cancerología

(INCan). Seguidamente se explica la dosimetría termoluminiscente, donde se dan las características del dosímetro termoluminiscente CaSO₄:Dy (TLD-900) utilizado en este trabajo y, finalmente, se presenta una revisión de los conceptos básicos de protección radiológica.

En el capítulo 2, se da una descripción del protocolo experimental, equipos y métodos de calibración usados para las medidas con TLD-900 junto a la relación matemática usada para los cálculos teóricos. Además se detallan los parámetros que definen la inclusión de cada familiar en la categoría que mejor representa su situación socioeconómica.

En el capítulo 3, se presentan las dosis efectivas recibidas por los familiares de los pacientes tratados con ¹³¹I para CDT, agrupándolas de acuerdo con la actividad de tratamiento administrada y a las características socioeconómicas de cada pareja paciente-familiar. Se muestran las dosis efectivas teóricas que recibiría un familiar promedio de cada una de las categorías, para todas las posibles actividades de tratamiento y al final de este capítulo se reporta la dosis externa que recibe un paciente hospitalizado, a causa de sus compañeros de cuarto, en las diferentes configuraciones posibles.

Finalmente, en el capítulo 4 se reportan las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 1. Conceptos básicos

1.1. Glándula tiroides

1.1.1. Anatomía y fisiología básica

La glándula tiroides, cuyo nombre se origina del griego “thyreos” que significa escudo [WA 06], es una de las estructuras endócrinas de mayor tamaño del organismo y su función principal es secretar la adecuada cantidad de hormonas tiroideas, que conservan el metabolismo de los tejidos de manera óptima y de calcitonina, que regula los valores circulantes de calcio [BA 10].

La forma de la glándula tiroides es similar a la de una mariposa y se encuentra localizada en la parte anterior de la tráquea al nivel del segundo y tercer anillo, extendiéndose usualmente hasta el sexto [AM 05]; está altamente vascularizada, teniendo uno de los mayores índices de flujo sanguíneo por gramo de tejido [BA 10].

Está constituida por dos lóbulos conectados mediante un puente hístico, de 12 a 15 mm de alto en la línea media, llamado *Istmo del tiroides*, como se muestra en la figura 1.1. Cada lóbulo tiene de 3 a 4 cm de largo, 2 cm de ancho y sólo unos pocos milímetros de espesor [WA 06]. En adultos la glándula tiroides tiene un peso promedio de 10 a 20 gramos.

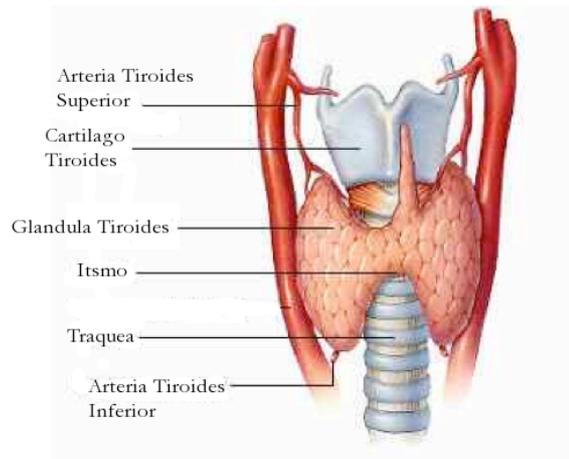


Figura 1.1. Glándula Tiroides. Adaptado de [NE 01]

Por su ubicación, la glándula tiroides está relacionada con importantes estructuras del cuello, provocando complicaciones quirúrgicas, en el tratamiento de cualquiera de sus alteraciones tanto estructurales como funcionales. Las principales estructuras de interés son los nervios laríngeos recurrentes, la tráquea, el esófago, el tronco simpático, las arterias carótidas y los nervios vago y frénico [AM 05].

La glándula está compuesta por dos tipos de células secretoras: las células foliculares y las células C. Estos dos tipos de células sintetizan la hormona tiroidea y la calcitonina, respectivamente. Para la producción de la hormona tiroidea, la glándula posee subunidades funcionales llamadas: *foliculos*, formados por células epiteliales dispuestas en una esfera que rodea un núcleo no celular de material proteináceo llamado *Coloide* [BA 10], siendo su principal elemento una gran glucoproteína, *la tiroglobulina*, cuya molécula contiene las hormonas tiroideas [GU 01]. (Ver figura 1.2)

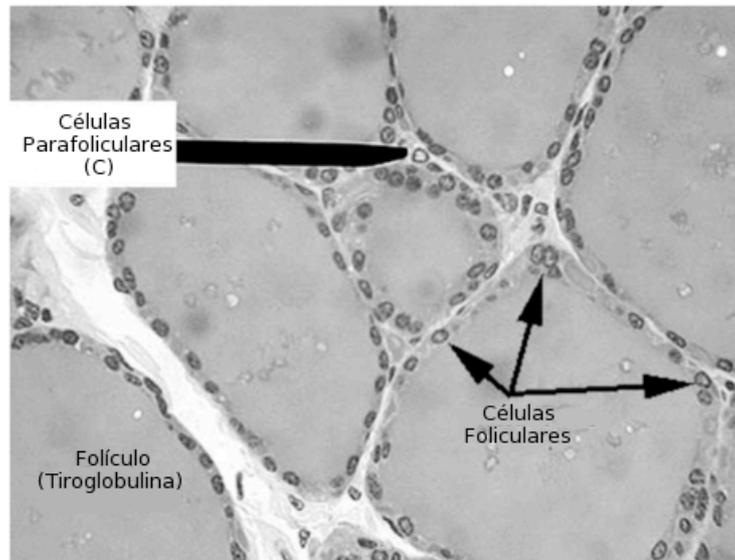


Figura 1.2. Folículo Tiroideo. Las células foliculares producen tiroglobulina y hormona tiroidea. Las células C, sintetizan y secretan calcitonina. Adaptada de: [AM 05]

La forma de las células epiteliales varía de acuerdo con el grado de estimulación que se ejerce en la tiroides para la secreción de hormonas tiroideas, siendo un epitelio cuboide cuando la estimulación es baja y columnar si la estimulación es alta [DV 10].

Cada folículo, está separado de los otros mediante una delgada capa de tejido conectivo, dentro de la cual se encuentran las células parafoliculares o células C, encargadas de la producción de calcitonina, como se mencionaba previamente.

1.1.1.1. Control de liberación de las hormonas tiroideas

La secreción tiroidea está controlada fundamentalmente por la **tirotropina u hormona tiroestimulante** (TSH), secretada por la adenohipófisis, que es a su vez controlada por la hormona liberadora de tirotropina (*TRH*) secretada por el hipotálamo. [AM 05].

La ausencia completa de secreción tiroidea determina a menudo un descenso metabólico hasta el 40-50% por debajo de lo normal, mientras que la secreción excesiva incrementa el metabolismo hasta un 60-100% por encima de lo normal, [GU 01].

En respuesta a la estimulación TSH, la célula folicular libera cada día alrededor de 80 a 10 μg de T4, una pequeña cantidad aproximadamente 10 μg de T3 y 100 μg de tiroglobulina. De esta manera, la medición de los niveles de tiroglobulina sérica, proporcionan un medio de supervisión del paciente después de una tiroidectomía. [GO 09].

1.1.1.2. Síntesis de hormonas tiroideas

Para la síntesis de las dos formas de hormona tiroideas biológicamente activas: tiroxina (T4) y la triyodotironina (T3), la glándula tiroides realiza el proceso que se describe brevemente a continuación:

1. Las células foliculares fabrican enzimas y la glucoproteína llamada *tiroglobulina*, son secretadas al interior del folículo, al *coloide*.
2. El yoduro es rápidamente absorbido de la dieta y es transportado a la glándula tiroides o excretado vía renal. Dentro de la glándula tiroides el yoduro es llevado a las células foliculares, quienes responden a la estimulación de la tirotropina (TSH), convirtiendo el yoduro a moléculas de yodo a través de una rápida oxidación, para su posterior transporte a los depósitos de coloide. [TH 08]
3. Las enzimas combinan el yodo con la tirosina en la molécula de tiroglobulina, creando al agregar un yodo a la tirosina, *monoyodotirosina* (MIT) y al agregar un segundo átomo de yodo *diyodotirosina* (DIT). La MIT y DIT sufren reacciones de acoplamiento, resultando de una MIT y una DIT, la T3 y la T4 del acoplamiento de dos DIT. [SI 08].
4. Las enzimas intracelulares liberan T3 y T4 de la proteína, de acuerdo con el nivel de estimulación de la TSH.
5. Ahora ambas hormonas se difunden fuera de las células foliculares, hacia el plasma, pero dado que son lipofílicas, tienen una solubilidad limitada en el

plasma, debiéndose unir a proteínas plasmáticas como la globulina ligadora de hormonas tiroideas (TGB). [SI 08]

Las hormonas tiroideas son secretadas de manera desproporcionada, la T4 alrededor del 93%, mientras que la T3 sólo el 7% restante; por lo cual, la mayor parte de las hormonas tiroideas en el plasma se encuentra en forma de T4. Sin embargo la función de estas hormonas es cualitativamente la misma, aunque difieren en la rapidez y la intensidad de la acción [GU 01]. Aproximadamente el 85% de la T3 activa se elabora por la eliminación enzimática de un átomo de yodo de la T4, cuando interactúa con el tejido (activación tisular), pues la T3 es cinco veces más activa biológicamente que la T4. [SI 08].

Como se evidenció previamente, el yodo es esencial para la función tiroidea normal, siendo la ingesta mínima diaria recomendada 150 µg en adultos [BA 10]. Si no hay yodo suficiente en la dieta no hay posibilidad de fabricar hormonas tiroideas en cuantía suficiente y esto puede ocasionar problemas que van desde una pequeña hiperplasia o Bocio no muy importantes, a una situación de severo retardo del crecimiento y déficit mental conocido como Cretinismo Endémico en zonas muy aisladas y de alimentación pobre y monótona deficitaria en yodo. [GO 09].

En condiciones normales, el almacenamiento de la hormona tiroidea es suficiente para mantener los niveles fisiológicos durante aproximadamente dos semanas. Razón por la cual, después de una tiroidectomía, los niveles séricos de hormona tiroidea caen varias semanas después.

1.2. **Cáncer de tiroides**

El cáncer de tiroides es la neoplasia endocrina más común y aunque por lo general exhibe un comportamiento benévolo, también es capaz de manifestarse como una neoplasia letal [GR 09]. Las tasas de incidencia anual varían de acuerdo con el área geográfica, la edad y el sexo. Es el cáncer de mayor incremento en la mujer, convirtiéndose en el sexto cáncer más común en mujeres y el segundo más común en mujeres menores de 45 años [OR 11].

De acuerdo con su histología, el cáncer de tiroides puede ser clasificado en dos grandes grupos: el grupo que se origina a partir de las células parafoliculares o células C y el que se origina a partir de las células foliculares. Dentro del grupo de los cánceres originados en las células foliculares, se encuentra una gran variedad: *El Cáncer diferenciado de tiroides*, *El Cáncer de tiroides pobremente diferenciado* y *el Cáncer de tiroides indiferenciado*; A diferencia de los originados de las células C donde sólo se encuentra: *El Cáncer medular* [AM 05].

Con lo anterior se puede observar que la mayoría de los carcinomas de tiroides llegan de las células foliculares, siendo el más predominante el cáncer diferenciado de tiroides que será descrito a continuación.

1.2.1. Cáncer diferenciado de tiroides

El *Cáncer Diferenciado de Tiroides (CDT)* corresponde a la primera subdivisión de los tumores foliculares y como su nombre lo indica describe todos los cánceres bien diferenciados provenientes de las células foliculares. Dentro de esta subdivisión se encuentran a su vez dos divisiones más: *El carcinoma papilar* y *El carcinoma folicular*.

El CDT suele permanecer confinado en la glándula tiroides por largo tiempo, pero a medida que avanza la edad de presentación esto se relaciona con mayor agresividad local y de su capacidad metastásica. La recaída del cáncer diferenciado ocurre con más frecuencia en los 5 primeros años, aunque algunas recaídas ocurren incluso después de 15 años [GR 09].

Los resultados terapéuticos, así como los factores determinantes de la progresión de la enfermedad, son difíciles de estudiar debido a su baja incidencia y tasa de mortalidad, pues conlleva a largos periodos de seguimiento.

1.2.1.1. Carcinoma papilar de tiroides

El carcinoma papilar de tiroides (CPT) y sus variantes representan el 80.3% del total de las lesiones malignas tiroideas, mientras que el carcinoma folicular sólo alcanza el 2.4%, [GR 09]. Este tipo de cáncer tiende a expresarse usualmente en los nodos linfáticos del

cuello, siendo comunes las metástasis ganglionares particularmente entre la población joven.

La mayoría de los CPT son no encapsulados y se infiltran en el parénquima que rodea la tiroides; sin embargo en alrededor del 10% de los casos de cáncer de tiroides papilar el tumor está rodeado por una cápsula fibrosa bien definida, [GR 09]. Esta última variante se caracteriza porque tiene un mejor pronóstico que las demás formas de CPT.

En general las personas con cáncer papilar no expresan metástasis o expresión del cáncer más allá del cuello, pero algunas veces se puede presentar metástasis en pulmón o huesos. Además tiende a presentarse en personas con edades entre 30 y 50 años y se desarrolla en mujeres tres veces más frecuente que en hombres. [RO 09].

De acuerdo con el manual de oncología del INCan [GR 09], el carcinoma papilar se separa en tres grupos en relación a su riesgo, permitiendo contextualizar las necesidades del tratamiento:

Bajo Riesgo

Incluye pacientes menores de 45 años, con tumores menores de 2 cm y sin metástasis. Tienen un excelente pronóstico de supervivencia. En estos casos, el objetivo del tratamiento consiste en obtener el control local con mínima morbilidad. La lobectomía suele controlar la enfermedad.

Riesgo Intermedio

En esta clasificación, se encuentran las metástasis ganglionares fuera del compartimiento central, con un excelente pronóstico de supervivencia si se someten al tratamiento apropiado. Se necesita una tiroidectomía total, la resección de los tejidos comprometidos y la disección del cuello, si existe enfermedad ganglionar. En esta categoría, el objetivo es obtener el control locorregional y optimizar el efecto del yodo radiactivo para abatir el riesgo de recaída.

Riesgo Alto

Vincula los pacientes mayores de 40 años con algún factor pronóstico adverso, como

rotura capsular, metástasis a distancia o tamaño de 2 cm; tienen un pronóstico de supervivencia menos favorable. Estos casos también deben tratarse con tiroidectomía total más resección de los tejidos implicados. El objetivo es optimizar el control local y el efecto del yodo radiactivo sobre eventuales metástasis a distancia

1.2.1.2. Carcinoma folicular de tiroides

La frecuencia del carcinoma folicular es mayor en regiones donde la dieta incluye concentraciones bajas de yodo y a diferencia del cáncer papilar, rara vez se asocia con metástasis ganglionares, pero sí con metástasis a distancia.

Por otra parte, ocurre con mayor incidencia en una edad más avanzada que el papilar, generalmente mayor a 50 años.

De manera similar al carcinoma papilar, de acuerdo con el manual de Oncología del INCan [GR 09], el carcinoma folicular sólo se puede considerar para su tratamiento en dos grupos:

Bajo Riesgo

Si el paciente es menor de 45 años, con mínima invasión, menor de 2 cm y sin metástasis a distancia. El pronóstico de supervivencia es muy bueno.

Alto Riesgo

Estos son aquellos pacientes mayores de 45 años o portadores de un tumor con invasión vascular extensa, o con tumores mayores de 2 cm o metástasis a distancia. Estos pacientes tienen un riesgo significativo de muerte por falla a distancia; debiéndose indicar tiroidectomía total y yodo posoperatorio.

1.2.2. Tratamiento para el cáncer diferenciado de tiroides

El tratamiento para el CDT, recomendado por la mayoría de endocrinos y cirujanos [IAEA 09], consiste en hacer una tiroidectomía total y luego una ablación del remanente tiroideo mediante la irradiación con partículas beta provenientes de ¹³¹I cuyo esquema de

decaimiento y propiedades se muestran en el Apéndice A. Los estudios con tiroidectomía total [MA 99b] han demostrado que la recurrencia y metástasis a distancia del tumor reducen significativamente, mejora la supervivencia y se facilita el seguimiento de la enfermedad.

La ablación se realiza entre 4 a 6 semanas y la eficiencia del ^{131}I es inversamente proporcional al volumen de tejido tiroideo residual. Es importante resaltar, que en algunos departamentos como el de medicina nuclear del INCan no se realiza un rastreo pos-operatorio para ver la captación de los remanente tiroideo, dado que algunos estudios revelan que las células tiroideas sufren un proceso de “aturdimiento” [HI 02], que ocasiona un decremento en su capacidad de captar ^{131}I , provocando una disminución en la eficacia del tratamiento ablativo.

1.2.2.1. Esquemas de dosis ablativas con ^{131}I

De acuerdo con las guías del INCan [GR 09], el método más utilizado para la determinación de las dosis ablativas es el de dosis fijas, tomando en cuenta los parámetros descritos a continuación:

Dosis fija baja

Diversos autores han propuesto dosis de 30 mCi; como ventajas, se cita menor radiación corporal total y la posibilidad de administrarla de forma ambulatoria.

Dosis fija alta

Es el esquema adoptado con mayor frecuencia, pues ha demostrado alta eficiencia para eliminar tejido tiroideo remanente, evitando la necesidad de repetir la administración del radioyodo. Este esquema varía en función de la localización de las lesiones:

- Si se encuentra en el lecho tiroideo, se recomienda de 100 a 150 mCi
- Si se constata afectación de ganglios linfáticos, se recomienda de 150 a 175 mCi.
- Si hay afectación de pulmones, de 175 a 200 mCi.
- Si se observa compromiso óseo, de 200 a 350 mCi.

1.2.2.2. Control de la evolución

Los controles se basan en el rastreo corporal y la determinación de tiroglobulina sérica. El primer control se realiza a los 6 meses, con la supresión de la hormonoterapia durante 4 a 5 semanas. Se realiza determinación sérica de TSH para garantizar valores mayores de 30 mUI/L, determinación de tiroglobulina y antitiroglobulina. Además se hace un rastreo con ^{131}I y si la exploración es positiva se administra un nuevo tratamiento. Si el primer control fue negativo, se seguirán realizando controles cada año con las mismas características. [GR 09].

1.2.2.3. Metas del tratamiento con ^{131}I

Dependiendo de la estratificación el riesgo de cada paciente, el objetivo de la primera dosis de Yodo radiactivo después de la tiroidectomía puede ser [ATA 09]:

- Ablación remanente: Para facilitar la detección de la recurrencia de la enfermedad y el estadio inicial.
- Terapia adyuvante: Para disminuir el riesgo de recurrencia y la mortalidad específica de la enfermedad mediante la destrucción de tejido sospechoso (No probado en enfermedades metastásicas).
- Terapia con yodo radioactivo: Para tratamientos conocidos como una enfermedad persistente.

1.3. Dosimetría Termoluminiscente

La termoluminiscencia consiste en la emisión de luz que ocurre durante el calentamiento de un material expuesto previamente a radiación ionizante. En algunos casos, la luz emitida es proporcional a la dosis impartida al material por lo que es posible utilizarlo como dosímetro [AT 86].

La termoluminiscencia se explica usando la teoría de bandas del estado sólido. La banda de energía más alta llena de electrones se llama “banda de valencia”; se denomina “banda de conducción” al nivel de energía donde la atracción del núcleo del átomo sobre los electrones es más débil. Ese nivel corresponde a la última órbita del átomo; en ella pueden compartirse y desplazarse los electrones de todos los átomos de un sólido. Estas bandas de energía de electrones permitidas se alternan con bandas de energía prohibida.

Los átomos que constituyen un sólido cristalino presentan un arreglo ordenado en tres dimensiones, sin embargo, en general se presentan imperfecciones debidas a defectos o impurezas en el cristal. Los defectos pueden ser impurezas, vacancias, centros F o intersticiales. Las impurezas son átomos ajenos al material que pueden ser contaminantes que aparecen al crecer el cristal o que pueden ser añadidos intencionalmente. Las vacancias se tienen cuando se presenta la ausencia de un ion dentro de la red cristalina. Un centro F es una vacancia de un ion halógeno que capta un electrón. Un intersticial se refiere a un átomo que está fuera de su lugar en la red cristalina pudiendo ser un átomo del mismo material o una impureza. Los defectos producen niveles de energía intermedios dentro de la banda prohibida que pueden funcionar como trampas de electrones, trampa de agujeros o como centros luminiscentes [AT 86] (Figura 1.3).

Las trampas de electrones pueden capturar y mantener a los portadores de carga en un pozo de potencial durante largos periodos. Los centros termoluminiscentes localizados en las trampas para electrones, emiten luz cuando los electrones y agujeros se recombinan en el centro [MC 85].

Cuando la radiación ionizante incide en el cristal se producen ionizaciones que proporcionan suficiente energía a los electrones de la banda de valencia para saltar a la banda de conducción (dejando un agujero en la banda de valencia) y moverse libremente hasta quedar atrapados en la trampa de electrones, quien los mantiene en un pozo de potencial de la banda prohibida durante largos periodos (Figura 1.3.a) [AT 86] y el agujero dejado migra hacia una trampa de agujeros. Posteriormente cuando el cristal se calienta el electrón atrapado adquiere suficiente energía para salir de la trampa y volver a

la banda de conducción, de donde migra a una trampa para agujeros, la cual actúa en este momento como un centro luminiscente, provocando la emisión de un fotón de luz (Figura 1.3.b).

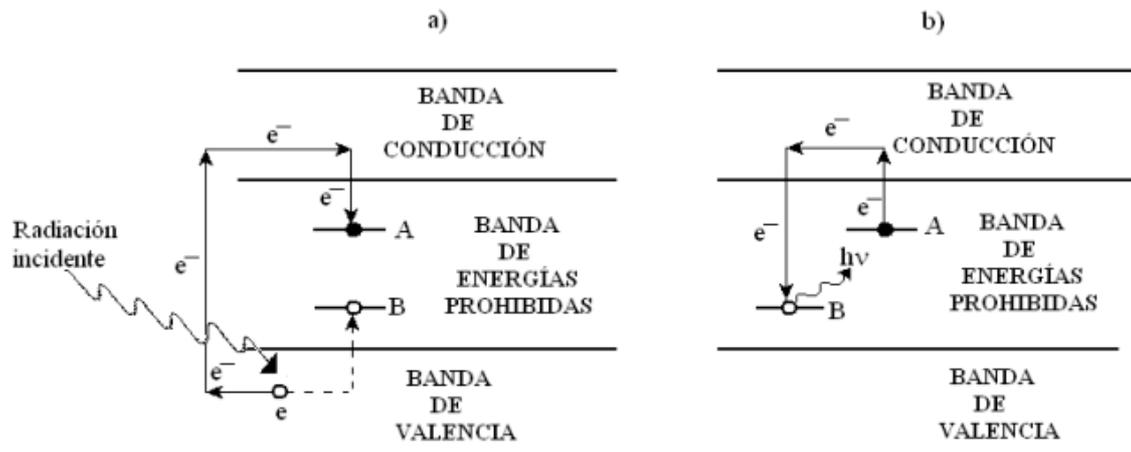


Figura 1.3 a) Esquema del mecanismo de excitación de electrones y agujeros durante la irradiación en un cristal TL b) Esquema del mecanismo de recombinación de los electrones y agujeros durante el calentamiento del cristal TL.

Un equipo lector calienta el material termoluminiscente y convierte la luz emitida por éste en corriente eléctrica (sección 2.1.1.2), creando una gráfica de la intensidad luminiscente en función de la temperatura, denominada *Curva de brillo*. Al aumentar la temperatura del cristal, la intensidad TL (luz emitida) crece hasta un cierto valor máximo, ya que hay un aumento en el número de electrones liberados de las trampas, y posteriormente disminuye debido a que quedan pocos electrones atrapados. La variación de los picos en la curva de brillo depende de las profundidades de las trampas y del número de trampas presentes en el cristal [GA 96]. El área bajo la curva es la respuesta termoluminiscente del dosímetro, inducida por la radiación ionizante a la que fue expuesto, permitiendo conocer mediante curvas de calibración, la dosis que el dosímetro recibió.

1.3.1. Sulfato de calcio: $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (TLD-900)

El TLD-900, es un dosímetro ampliamente conocido por su alta sensibilidad. Esta sensibilidad se debe a su alto número atómico efectivo (15.3), el cual a su vez provoca una sobrerrespuesta para bajas energías de fotones como se muestra en la Figura 1.4. Su principal desventaja es que no es tejido-equivalente.

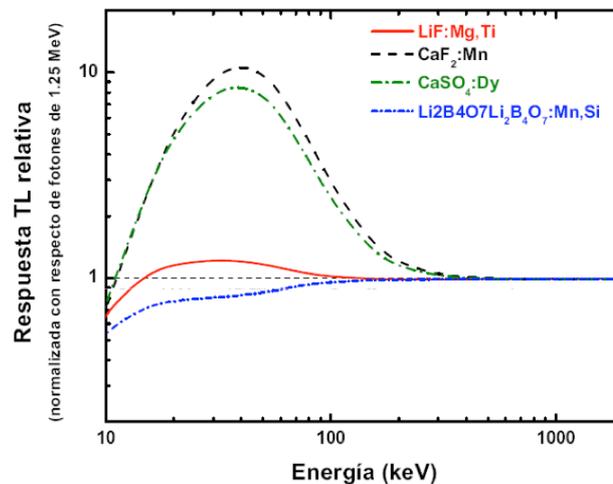


Figura 1.4. Respuesta TL como función de la energía relativa a aire de algunos de los DTL más usados. Adaptada de [ZO 00]

Las características principales de la curva de brillo del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dependen de los detalles en los procedimientos de preparación. Los más usados presentan tres picos el primero a una temperatura de 65°C , el segundo a 105°C y el principal llamado pico dosimétrico, por ser el más estable, a 220°C [HO 84], Figura 1.5. Los dos primeros picos, en especial el primero, exhiben desvanecimiento térmico dada su baja temperatura por lo que deben ser suprimidos de la curva de brillo utilizada para los valores de dosis calculados en este trabajo.

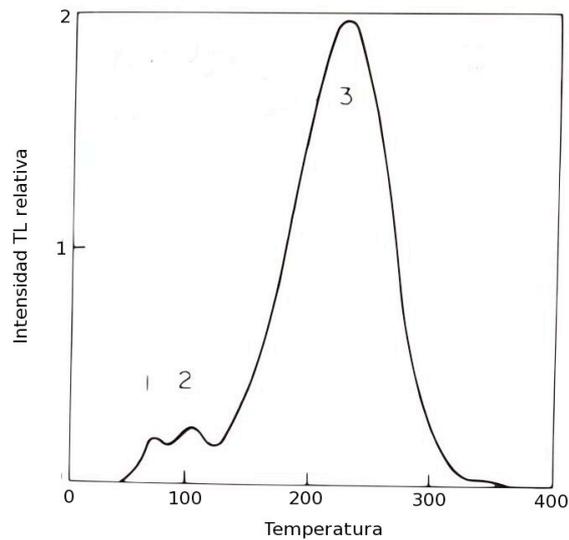


Figura 1.5. Curva de brillo de CaSO: Dy. Adaptada de [HO 84].

De acuerdo con la información dada por el fabricante, los CaSO₄: Dy usados en este trabajo, presentan un desvanecimiento del 2% al mes y una respuesta lineal para dosis en el intervalo de 1 μ G a 100 Gy (para energías mayores que 304 keV).

1.4. Protección Radiológica

La Protección Radiológica tiene como finalidad proteger a los individuos y a sus descendientes de los posibles efectos perjudiciales de las radiaciones ionizantes [IT 08]. Para tal fin, una gran cantidad de organizaciones se ha dedicado a emitir recomendaciones que se han modificado con los años conforme a los resultados de las investigaciones que han proporcionado conocimientos acerca de los efectos de las radiaciones ionizantes en el ser humano.

En este capítulo se tomará como fuente principal las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés), emitidas en su publicación No. 103 [ICRP 07]. La ICRP es uno de los grupos más antiguos (desde 1928) cuyo objetivo principal es proteger la salud humana mediante el control de la exposición a la radiación ionizante, con la finalidad de evitar efectos deterministas [RO 08].

En este capítulo se abordan los siguientes temas: magnitudes utilizadas en protección radiológica, principios que rigen la aplicación de la protección radiológica, límites de dosis establecidos para cada una de las clasificaciones de exposiciones y recomendaciones que se dan para el paciente tratado con radionúclidos antes y después de su egreso del hospital.

1.4.1. Cantidades Físicas Básicas

Radiación Directamente Ionizante

Son partículas cargadas que liberan su energía en la materia directamente, a través de múltiples interacciones coulombianas a lo largo de sus trayectorias. Los electrones, positrones, partículas α , protones y núcleos pesados son este tipo de radiación.

Radiación Indirectamente Ionizante

Son rayos X, γ o neutrones (es decir, partículas que carecen de carga), que primero transfieren su energía a las partículas cargadas del medio en que inciden y son éstas las que depositan la energía en el medio produciendo la ionización.

Actividad

Es el número de transformaciones nucleares que ocurren en una cantidad definida de algún material radiactivo por unidad de tiempo, esto es:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

donde A es la actividad y dN es el valor esperado del número de transformaciones nucleares espontáneas que ocurren en un intervalo dt.

Su unidad es el Becquerel (Bq), que es igual a 1 desintegración por segundo; anteriormente se utilizaba el Curie; $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

Exposición

La exposición es la carga eléctrica que se libera en una unidad de masa de aire por los fotones incidentes y se define por la Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (ICRU, por sus siglas en inglés) como:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1.1)$$

Donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en el aire, cuando todos los electrones liberados por fotones en una masa dm son completamente detenidos en el aire.

Actualmente esta magnitud está cayendo en desuso, reemplazándose por Kerma en aire.

Dosis Absorbida

Es la energía promedio depositada por radiación ionizante, por unidad de masa:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (1.2)$$

donde D es la dosis absorbida y dE es el valor esperado de la energía impartida en un volumen infinitesimal de masa dm .

Su unidad es el Gray (Gy), $1\text{Gy} = 1\text{ J/Kg}$.

Kerma

El Kerma (Kinetic Energy Release in Matter) es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas $d\varepsilon$, liberadas por partículas ionizantes sin carga por unidad de masa m .

$$K = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (1.3)$$

Su unidad es el Gray (Gy).

1.4.1.1. 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 se puede disipar de dos maneras: pérdidas de energía por colisión y pérdidas radiativas (Bremsstrahlung y aniquilación electrón-positrón). El kerma total denominado K está dado por:

$$K = K_{\text{col}} + K_{\text{rad}} \quad (1.4)$$

Donde 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. 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:

$$K_{\text{col}} = K(1-g) \quad (1.5)$$

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

$$K_{\text{col}} = \psi(\mu_{\text{en}}/\rho) \quad (1.6)$$

Y el kerma total por:

$$K = \psi(\mu_{\text{tr}}/\rho) \quad (1.7)$$

Donde ψ es la fluencia de energía, μ_{en}/ρ es el coeficiente másico de absorción en un medio de densidad ρ y μ_{tr}/ρ es el coeficiente másico de transferencia de energía.

De manera general, la transferencia de energía (kerma) a partículas cargadas del medio en una región particular no significa que toda esa energía se absorba (dosis absorbida) en la misma región ya que los electrones secundarios generados por la interacción de la radiación con la materia tienen un alcance que puede llevar la energía a zonas externas a la región de interés. En el caso de que esta región de interés esté rodeada de suficiente materia para que el número de electrones en movimiento producidos fuera de la región

de interés y que entren a ella sean iguales en número a los que salgan entonces se dice que existen condiciones de equilibrio de partícula cargada (EPC). Adicionalmente, en relación a las pérdidas radiativas, la mayor parte de los fotones escapan de la región de interés, por lo cual la dosis absorbida se relaciona usualmente con el kerma de colisiones K_{col} . En el caso especial en que existe equilibrio de partícula cargada se tiene que:

$$D = K_{col} = K (1-g) \quad (1.8)$$

1.4.1.2. Relación entre Exposición y Kerma

La exposición en un punto debido a la fluencia de energía ψ de fotones monoenergéticos de energía E y usando la ecuación 1.6 es:

$$\begin{aligned} X &= \psi (\mu_{en}/\rho)_{aire} (e/\bar{w})_{aire} = (K_{col})_{aire} (e/\bar{w})_{aire} \\ X &= (K_{col})_{aire} / 33.97 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Donde \bar{w} es la energía media requerida para producir un par de iones en aire y “e” es la carga del electrón (1.602×10^{-19} C).

1.4.1.3. Relación entre Dosis y Exposición

En condiciones de equilibrio de partícula cargada la dosis en un punto para un medio es igual al kerma de colisiones (ecuación 1.8); la dosis en aire bajo estas condiciones es:

$$D_{aire} = (K_{col})_{aire} = X (\bar{w}/e)_{aire} \quad (1.10)$$

Por otro lado, como podemos ver en la expresión 1.6 el kerma de colisión depende del material con el que interaccionan los fotones y de su energía. Por lo tanto, si se conoce el kerma en aire se puede conocer el kerma en cualquier material por medio del cociente de los coeficientes másicos de absorción de energía, para el caso particular de tejido se tiene:

$$(K_{col})_{tejido}/(K_{col})_{aire} = (\mu_{en}/\rho)_{tejido} / (\mu_{en}/\rho)_{aire} \sim 1.1 \quad (1.11)$$

Finalmente, si se conoce la exposición en aire se puede conocer la dosis en tejido mediante las expresiones que relacionan kerma de colisión con exposición (ecuación 1.9) y dosis con kerma de colisión (ecuación 1.8).

$$D_{\text{tejido}} = (K_{\text{col}})_{\text{aire}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{tejido}} / (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{aire}} \quad (1.12)$$

1.4.2. Magnitudes de Protección

1.4.2.1. Dosis equivalente

El uso de la dosis absorbida no es totalmente adecuado para fines de protección radiológica, dado que el efecto biológico depende del tipo de radiación incidente. Por este motivo se multiplica la dosis promedio sobre un órgano o tejido ($D_{R,T}$) por un factor de ponderación W_R que depende del tipo de radiación R (Tabla 1.1) , llamando a esta magnitud *Dosis Equivalente* (H_T):

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

La suma hace referencia a todos los tipos de radiación presentes. La unidad de H_T es conocida como Sievert (Sv), $1 \text{ Sv} = \text{JKg}^{-1}$.

Tabla 1.1. Factores de ponderación recomendados por tipo de radiación [ICRP 07]

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.	20
Neutrones	Función continua dependiente de la energía ¹

¹No se muestra, dado que no es de relevancia para el desarrollo del presente trabajo, pero se encuentra en la referencia [ICRP 07]

1.4.2.2. Dosis Efectiva

Dado que cada tejido tiene diferente radiosensibilidad es necesaria una magnitud que permita expresar el posible efecto biológico total producido por las diferentes dosis equivalentes recibidas en los distintos órganos y tejidos del cuerpo. Por tal motivo, la Dosis efectiva (E) se define como la suma de los productos de las dosis equivalente recibidas en cada tejido o órgano ponderadas por el factor correspondiente a dicho tejido o órgano (W_T) (Tabla 3.2).

$$E = \sum W_T H_T = \sum W_T \sum W_R D_{T,R} \quad (1.13)$$

Tabla 1.2. Factores de ponderación de los tejidos del cuerpo [ICRP 07]

Tejido	W_T	ΣW_T
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos ²	0.12	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0.04	0.16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel.	0.01	0.04
	Total	1.00

1.4.3. Magnitudes Operativas

Dado que ni la dosis equivalente ni la dosis efectiva, pueden cuantificarse por medición directa, se han creado magnitudes operativas que se puedan medir directamente y permitan hacer estimaciones de la dosis efectiva y equivalente.

En esta sección, solo se presentan las magnitudes operativas que tienen relevancia en el desarrollo de este trabajo [ICRP 07]:

²Resto de los tejidos: Adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix.

Dosis equivalente personal

Para dosimetría externa, la magnitud operativa a considerar, es la *Dosis equivalente personal* $H_p(d)$, de acuerdo con el ICRU está definida como el equivalente de Dosis en tejido blando a una profundidad apropiada d , por debajo de un punto específico sobre el cuerpo humano. Su unidad es el Sievert (Sv).

Para la estimación de una dosis efectiva, suponiendo una exposición uniforme a cuerpo entero, se elige $d=10$ mm y para la estimación de la dosis en piel, en manos y pies se elige $d=0.07$ mm.

1.4.4. Categorías de exposición

La ICRP emite sus recomendaciones en relación con la *Exposición* a radiación ionizante a la cual cada persona es sometida de acuerdo con las actividades que realice. Las situaciones que se puedan presentar se clasifican en tres grupos:

- *Situaciones de exposición planificada:* Son aquellas que involucran la introducción y operación planeada de fuentes, previamente categorizadas como prácticas (ICRP 60).
- *Situaciones de exposición existente:* Se refiere a las situaciones que ya existen cuando tiene que ser tomada una decisión sobre su control, como las causadas por la radiación de fondo natural o las situaciones de exposición prolongadas después de emergencias.
- *Situaciones de exposición de emergencia:* Son situaciones inesperadas, que demandan una atención urgente, como las que pueden ocurrir durante la operación de una situación planificada o de un acto malévolo.

Las exposiciones médicas de pacientes también son situaciones de exposición planificada, pero dadas sus características especiales son tratadas separadamente.

De acuerdo con esta distribución de situaciones, la ICRP clasifica las exposiciones de la siguiente manera:

1.4.4.1. Exposición Ocupacional

La exposición ocupacional está definida como toda exposición a radiación de los trabajadores ocurrida como resultado de su trabajo. Los trabajadores que por su ocupación puedan quedar expuestos a radiación se denominan *Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)* y deben ser sometidos a vigilancia radiológica, la cual es responsabilidad del nivel gerencial superior de la organización.

1.4.4.2. Exposición del público

Esta categoría comprende todas las exposiciones que no sean ocupacionales ni médicas de pacientes. Se produce como resultado de un conjunto de fuentes de radiación, siendo las fuentes naturales la mayor contribución, seguidas de los rayos gamma terrestres.

Las exposiciones del embrión o feto en los casos de trabajadoras embarazadas se consideran y están reglamentadas como exposiciones del público.

1.4.4.3. Exposición médica de pacientes

La exposición a la radiación de pacientes ocurre en procedimientos diagnósticos, intervencionistas y terapéuticos. En esta categoría la exposición es intencional y para beneficio directo del paciente. El uso de radiaciones con fines médicos deberá evitarse a menos que sea justificado.

1.4.5. Principios de protección radiológica

Las recomendaciones del ICRP 60, proponen un sistema de protección radiológica, basado en los siguientes principios:

- *Principios de justificación:* Cualquier decisión que altere la situación de exposición a la radiación debería ocasionar más beneficio que daño.

- *Principios de optimización de la protección:* Para una situación determinada, el número de personas expuestas y la magnitud de sus dosis individuales deben ser mantenidas tan bajas como razonablemente pueda lograrse, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales.
- *Principios de aplicación de límites de dosis:* La dosis total a todo individuo debida a fuentes controladas en situaciones de exposición planificada, sin tener en cuenta la exposición médica a los pacientes, no debería exceder los límites apropiados especificados por la ICRP (Ver sección 3.4).

Cabe mencionar que éste es el único principio relacionado con el individuo a diferencia de los otros dos relacionados con fuentes de radiación ionizante.

1.4.6. Límites de Dosis

Son sólo aplicables a situaciones de exposición planificada con excepción de las exposiciones médicas de pacientes y continúan siendo los emitidos por el ICRP 60 [ICRP 90] dado que siguen proporcionando un nivel adecuado de protección.

Dentro de una categoría de exposición, ocupacional o del público, los límites de dosis se aplican a la suma de las exposiciones provocadas por fuentes relacionadas con prácticas que ya están justificadas.

A continuación se muestran los límites de dosis recomendados para cada categoría de exposición a las que son aplicables.

Tabla 1.3. Límites de dosis recomendados en situaciones de exposición planificada [ICRP 07]

Tipo de límite	Dosis efectiva
Ocupacional	20 mSv por año promediada en periodos definidos de 5 años ³
Público	1 mSv en un año

³Con la condición de que la dosis efectiva no debe exceder los 50 mSv en ninguno de los años individuales.

Es importante resaltar que estos límites de dosis no involucran individuos del público general que estén al cuidado y acompañamiento de pacientes que hayan sido dados de alta en un hospital luego de una terapia con radionúclidos. (Ver sección 1.5)

Cabe mencionar que aunque la Normativa Mexicana, está basada en el ICRP 26 [ICRP 77] que indica que los límites de dosis para POE y público general son 50 y 5 mSv por año respectivamente, el Departamento de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Cancerología de México considera los valores recomendados, mostrados en la Tabla 1.3.

1.5. Protección radiológica de pacientes tratados con radionúclido

Los radionúclidos son usados en el diagnóstico y tratamientos de varias enfermedades en forma de radiofármacos⁴ que son dados a los pacientes por inyección, ingestión o inhalación. Estos radiofármacos pueden localizarse en algún tejido del cuerpo hasta que decaigan o pueden ser eliminados a través de varias vías. Sin embargo, el uso de radionúclidos puede resultar en la exposición no sólo del paciente, sino también de las personas que lo rodean, siendo necesaria una orientación en materia de protección radiológica para todas las personas involucradas en el tratamiento.

La ICRP en su publicación 94 “*Liberación de pacientes después de una terapia con radionúclidos*” [ICRP 04], cubre tanto los procedimientos de terapia como de diagnóstico que involucran radionúclidos, enfocados principalmente en el ¹³¹I, ya que es considerado como la mayor fuente de exposición para el personal y familiares cuando se proporciona una terapia con radionúclidos. Esta publicación recomienda que los individuos involucrados directamente en el cuidado y compañía de cada paciente deben tener una restricción de dosis máxima de 5 mSv por episodio; excediendo los límites de dosis estipulados para el público general.

Este límite de dosis no debe aplicar a infantes, niños jóvenes y visitantes casuales, ellos deben ser tratados como público general con una dosis límite recomendada de 1mSv/año.

⁴Combinación de un isótopo radioactivo y una sustancia transportadora.

El ICRP recomienda explícitamente que la orina no debe ser almacenada y que los pacientes deben ser hospitalizados después de la terapia con actividades de radiofármacos. Después de una terapia con radioyodo el amamantamiento está absolutamente contraindicado.

1.5.1. Egreso de pacientes tratados con radionúclidos.

Posteriormente a la administración de la dosis terapéutica de radioyodo a los pacientes con CDT, éstos puede ser liberados u hospitalizados, de acuerdo con las normativas por las que se rija el hospital donde se realice el tratamiento.

1.5.1.1. Normativa vigente en México.

Los requisitos generales de seguridad radiológica para egresar⁵ a pacientes a quienes se les ha administrado material radioactivo se establecen en la norma oficial mexicana “NOM-013-NUCL-2009” [NOM 09]. Esta norma indica que únicamente se podrá egresar a los pacientes que produzcan una rapidez de equivalente de dosis⁶ menor a 0.05 mSv/h a un metro de distancia o a los que tengan una actividad residual del material radiactivo administrado menor a 1110 MBq (30 mCi). De lo contrario todos los pacientes con material radiactivo administrado deben permanecer hospitalizados y bajo vigilancia médica.

Además, en esta norma se indica que se deben proporcionar instrucciones verbales por parte del médico especialista en medicina nuclear y/o del encargado de seguridad radiológica.

1.5.1.2. Recomendaciones Internacionales.

Las regulaciones concernientes al egreso de pacientes, después de la administración de radionúclidos, varían ampliamente alrededor del mundo debido a que se basan en suposiciones que reflejan la situación actual de cada país. Sin embargo, aunque la ICRP

⁵Condición radiológica de un paciente al que se le ha administrado material radiactivo, que hace posible permitirle el abandono de la zona controlada de la instalación.

⁶Es equivalente a la magnitud de Dosis equivalente, en el ICRP 103 (Sección 1.4.2.1.).

no ha emitido ninguna recomendación acerca de cuál debería ser la modalidad de egreso más adecuada, en su publicación 94 [ICRP 04] menciona que la modalidad basada sólo en la actividad retenida no es la más adecuada dado que además de este factor, deben ser tenidos en cuenta factores tanto económicos como sociales y hasta los mismos deseos de cada paciente.

Con un planteamiento similar, en febrero del 2010, la IAEA emitió un documento [IAEA 10] en el que recomienda que la protección radiológica debe basarse en los principios de justificación y optimización aplicados a cada individuo, considerando factores tanto económicos como sociales de forma individual. De esta manera la decisión de hospitalizar o liberar a los pacientes tratados con radionúclidos debe ser determinada individualmente, considerando factores como: su condición médica, las circunstancias domésticas de los pacientes y su posibilidad de aislamiento, así como la presencia de niños y mujeres embarazadas en la casa.

Capítulo 2. Metodología

Gran parte del desarrollo de este trabajo es experimental, siendo primordial la preparación y lectura de los dosímetros utilizados. En este capítulo se describen los procedimientos experimentales llevados a cabo para conseguir las condiciones óptimas de medición, junto los equipos, materiales y protocolos utilizados. Posteriormente se describe el proceso de clasificación de los familiares y finalmente se obtiene la relación que se usa para el cálculo teórico de la dosis recibida por cada familiar.

2.1. Equipos y materiales

En este trabajo, se utilizó un lote de 95 dosímetros comerciales de Sulfato de Calcio con impurezas de disprosio, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ (TLD-900) en forma de tabletas sólidas, con dimensiones de 3.175 x 3.175 x 0.89 mm, cuyas características se describieron en la sección 2.1. Este tipo de dosímetro, fue seleccionado dado que presenta una alta sensibilidad para dosis bajas.

2.1.1. Dosímetros termoluminiscentes

El uso de los dosímetros se realiza de acuerdo con un protocolo de trabajo que consiste de tres etapas: tratamiento térmico, irradiaciones y lecturas de la señal termoluminiscente. Se espera entre 24 y 48 horas entre cada etapa.

2.1.1.1. Tratamientos térmicos

Antes de ser usados, los dosímetros deben someterse a un tratamiento térmico con el fin de restablecer sus características iniciales, dispersando las impurezas a su configuración original.

El tratamiento térmico consistió de un horneado en aire a una temperatura de 400°C durante 30 minutos, para ello se utilizó un horno marca Thermolyne, modelo F47915 del Laboratorio de Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM (IFUNAM). Al sacarlos del horno se dejan enfriar hasta temperatura ambiente antes de colocarlos en contenedores.

2.1.1.2. Lectura de los DTL

La lectura de los DTL es un proceso que consiste en la medición de la señal luminosa emitida cuando los dosímetros irradiados son sometidos a altas temperaturas. El equipo lector utilizado fue el Harshaw 3500 del laboratorio de dosimetría del IFUNAM (ver figura 2.1).



Figura 2.1. Equipo Lector Harshaw 3500, propiedad del IFUNAM

El equipo lector consta de una plancheta, en la cual es puesto el dosímetro para ser calentado a un intervalo de temperatura definido, con una tasa de calentamiento constante. La señal emitida por el dosímetro es recibida por un tubo fotomultiplicador (TFM) que la transforma en corriente, para que un sistema electrónico la integre durante

el tiempo de lectura y acoplado a una computadora con un software de adquisición de datos, muestre en el monitor la curva de brillo obtenida para cada dosímetro. De forma simultánea el software de adquisición de datos crea un archivo ASCII con todos los datos obtenidos durante la lectura. (Ver figura 2.2)

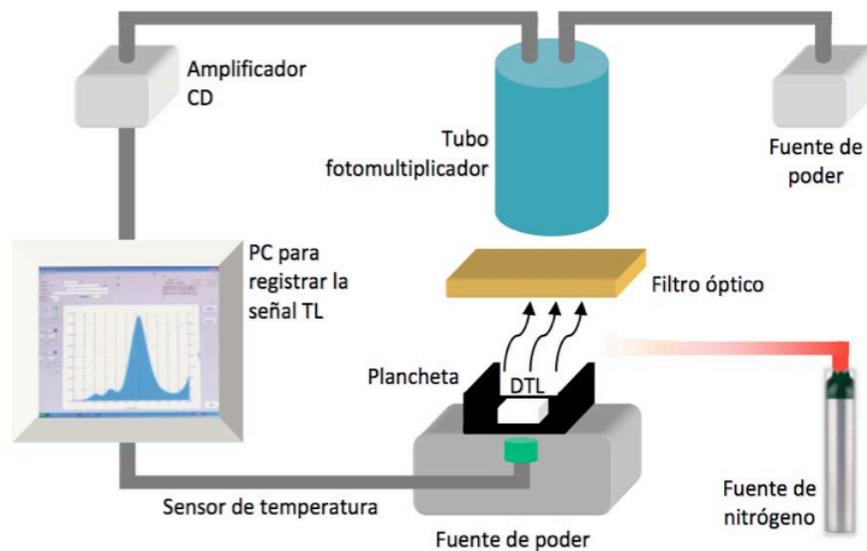


Figura 2.2. Diagrama esquemático del equipo lector TL, Harshaw 3500 [RE 11]

En este trabajo, las lecturas de cada dosímetro se tomaron de acuerdo con el siguiente protocolo:

- Temperatura controlada del laboratorio de dosimetría del IFUNAM entre 18 y 20°C.
- Flujo de gas N₂, necesario para evitar posibles contaminaciones causadas por el cristal y la plancheta.
- Pre calentamiento a 120°C durante 30 segundos.
- Calentamiento entre 120°C y 350°C durante 23 s, a una tasa de calentamiento de 10°C/s.
- Voltaje de operación del TFM de 891 V

Con el propósito de corroborar su óptimo funcionamiento, cada vez que se utiliza el equipo lector, se debe tomar “la señal de referencia” que consiste en la lectura de la señal luminosa emitida por una fuente emisora de luz con intensidad constante que queda expuesta frente al tubo fotomultiplicador cuando la plancheta es sacada, de esta manera si se mantiene un mismo valor para los parámetros de lectura habituales, se puede suponer que el equipo está funcionando bien [GA 96].

2.1.1.3. Caracterización de los DTL.

Para obtener el valor de la dosis efectiva recibida por cada uno de los familiares al cuidado de los pacientes tratados con ^{131}I , es de suma importancia utilizar un conjunto de dosímetros que presente una respuesta TL homogénea y reproducible, ya que esto permite obtener resultados más precisos.

La prueba de homogeneidad, permite conocer la desviación de cada una de las respuestas TL de los dosímetros del lote expuesto a una misma dosis, respecto al valor medio de todas las respuestas TL del mismo lote. Mediante la prueba de reproducibilidad se obtiene la dispersión causada por el uso repetido de cada DTL.

Para realizar las pruebas los dosímetros fueron horneados, después de 24 horas se irradiaron exponiendo cada dosímetro a una dosis de 0.4 Gy utilizando una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ emisora de radiación beta [BU 05]. A la fecha de inicio de las pruebas, la fuente presentaba una tasa de dosis de 0.324 cGy/s (3 de Abril de 2011) y el tiempo de exposición fue de dos minutos con cinco segundos. Después de 24 h se tomaron las lecturas. Este procedimiento se realizó tres veces, teniéndose tres medidas por cada dosímetro.

A partir de las lecturas se encuentra la respuesta TL tomando el área bajo la curva de una región de interés del pico principal de los dosímetros TLD-900, eliminando contribuciones provenientes de baja y alta temperatura.

A partir de las tres medidas de respuesta TL, se determina un *factor de corrección* C_{ij} por dosímetro [MA 93], que permite corregir por las diferencias entre las respuestas de los DTL expuestos a una misma dosis. Este factor se define, como:

$$C_i = \sum_{j=1}^m \frac{C_{ij}}{m} \quad (2.1)$$

donde C_{ij} , está a su vez definido como:

$$C_{ij} = \sum_{i=1}^n \frac{R_{ij}}{nR_{ij}} \quad (2.2)$$

siendo R_{ij} la lectura j -ésima ($j=1,2,\dots, m$) tomada al i -ésimo dosímetro ($i=1,2,3,\dots, n$), m el número de las lecturas tomadas y n el número de dosímetros del lote, que para este caso son 3 y 91, respectivamente.

2.1.1.4. Calibración de los DTL

El proceso de calibración, consiste en exponer los dosímetros a diferentes valores de una magnitud de interés conocida, leer su señal TL y finalmente hacer una gráfica de la magnitud conocida en función de la respuesta TL. Esta gráfica permite predecir la relación entre la magnitud de interés y la respuesta TL para el lote de dosímetros utilizado.

En este trabajo se expusieron los dosímetros a valores conocidos de kerma en aire en el departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) utilizando una fuente de ^{137}Cs . Se necesitaron cinco contenedores de acrílico con un espesor de 3.6 mm, colocando dos dosímetros TLD-900 en cada contenedor.

Las irradiaciones se hicieron a tres metros de la fuente, variando el tiempo de exposición de acuerdo con el valor de kerma en aire deseado (ver figura 2.3). Los valores de kerma en aire utilizados fueron: 0.5, 1.25, 2.0, 2.75 y 3.5 mGy.

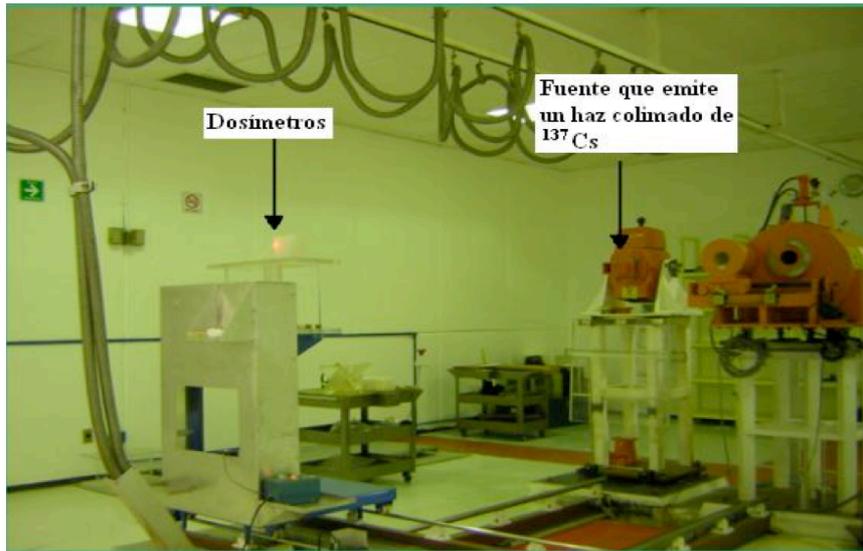


Figure 2.3. Montaje experimental para la calibración de los dosímetros

2.2. Evaluación de la dosis recibida por los familiares al cuidado de pacientes tratados con ^{131}I

2.2.1. Medición mediante dosimetría termoluminiscente

Al familiar al cuidado de un paciente tratado con ^{131}I le fueron suministrados cuatro dosímetros ubicados dentro de una caja rectangular de 3 x 2 x 0.8 cm, denominada *portadosímetro*, que a su vez es contenida en una bolsa de tela, para facilitar su constante uso como se muestra en la figura 4.4. Los familiares portaron el portadosímetros a nivel del pecho, durante 15 días a partir del momento en que cada paciente fue egresado del hospital

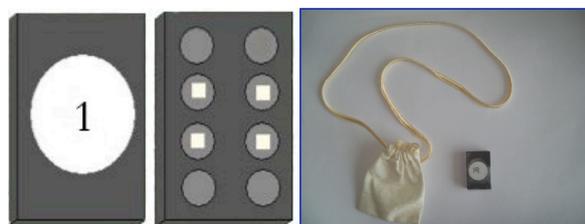


Figura 2.4. Dimensiones y diseño del portadosímetros, dado a cada familiar

Por cada familiar, además del portadosímetro que le es suministrado, se prepararon dos portadosímetros más de las mismas características y bajo las mismas condiciones llamados *testigos*. Uno de estos permanece en el laboratorio de dosimetría del IFUNAM y el otro en una zona libre de radiaciones ionizantes del departamento de medicina nuclear del INCAN, hasta que el portadosímetro del familiar es devuelto.

El objetivo de la preparación de estos portadosímetros adicionales es conocer la contribución de la radiación recibida por los dosímetros antes y después de ser usados por el familiar, principalmente debida al fondo natural y al transporte de los dosímetros del IFUNAM al INCAN y viceversa.

Pasados los 15 días, los portadosímetros son recolectados y aproximadamente 24 horas después, se toman las lecturas TL. Por cada portadosímetro se obtienen 4 medidas de respuesta TL, las cuales son corregidas por su respectivo factor (ver sección 2.2) y posteriormente promediadas, encontrando un valor de respuesta TL por cada familiar.

Posteriormente, a partir de las medidas de calibración se obtienen los valores correspondientes de kerma en aire y éstos se convierten a valores de kerma en tejido utilizando el cociente entre los coeficientes de absorción másico de tejido y aire. (Ecuación 1.11) Finalmente, a partir de los valores de kerma en tejido se obtiene dosis efectiva multiplicando por el factor de calidad del tipo de radiación $W_R = 1$ ya que los familiares al cuidado de cada paciente están expuestos a radiación gamma y por el factor de ponderación por el tipo de tejido W_T que en este trabajo se toma igual a 1 ya que en este trabajo consideramos las dosis evaluadas a partir de las respuestas TL de dosímetros ubicados a nivel del pecho como dosis recibida a cuerpo entero, de manera similar a como se reporta en el trabajo de Pant y colaboradores [PA 06a]. Esto se mostrará en detalle en el capítulo 3.

2.2.2. Cálculos teóricos

El modelo dosimétrico utilizado para calcular la dosis total recibida por el familiar al cuidado del paciente tratado con ^{131}I , está basado en la guía regulatoria 8.39 de la comisión reguladora nuclear de los Estados Unidos [USNRG 97].

Este modelo supone un decaimiento multiexponencial para la actividad retenida a cuerpo entero, compuesto de tres periodos:

□ Período de Pre equilibrio:

Es el tiempo que tarda la tiroides en captar el ^{131}I que le es administrado al paciente. El modelo supone que este periodo, en el que hay una mínima eliminación biológica, de acuerdo con medidas experimentales [WA 06], tiene una duración de 8 horas. La vida media efectiva del ^{131}I durante este periodo es considerada constante y se estima que corresponde al 80% de su vida media física [USNRG 97].

La dosis en aire recibida por el familiar durante el periodo de pre equilibrio, D_{pre} , viene dada como:

$$D_{pre} = \frac{\Gamma t A}{r^2} \quad (2.3)$$

Pero dado que la actividad A, es función del tiempo, se integra desde el momento que se administró el radionúclido ($t=0$), hasta el final del periodo de pre equilibrio ($t=8\text{h}$):

$$D_{pre} = \frac{\Gamma}{r^2} A_0 \int_0^{0.33d} e^{-\frac{\ln|2|}{0.8T_{1/2}}t} dt$$

$$D_{pre} = 0.017 \frac{A_0}{r^2} [\text{mSv}] \quad (2.4)$$

donde:

A_0 , es la actividad de ^{131}I al momento de ser administrado al paciente.

Γ , es la constante gamma del ^{131}I , dada en $[\text{mSv} \times \text{m}^2/\text{mCi} \times \text{d}]$, (Apéndice A).

$T_{1/2}$, es la vida media física del ^{131}I dada en días (Apéndice A), y

r , la distancia del paciente al familiar en m.

□ Periodo de Restricción

Es el tiempo en que el paciente cambia algunos de sus hábitos, principalmente las interacciones sociales debido a la presencia del ^{131}I en su cuerpo. (ver Apéndice B).

El remanente de ^{131}I considerado durante este periodo, es dividido entre la componente tiroidal y la extratiroidal⁷. Las vidas medias asumidas para cada una de las componentes son 7.3 y 0.32 d respectivamente [USNRG 97] [ICRP 88]. Ahora, teniendo en cuenta que cuando el periodo de restricción comienza, la actividad remanente es $0.965A_o$, la dosis en aire durante el periodo de restricción, D_{Res} , será:

$$D_{Res} = 0.965A_o \frac{\Gamma}{r^2} \left(U \int_0^{t_R} e^{-\frac{\ln|2|t}{7.3}} dt + (1 - U) \int_0^{t_R} e^{-\frac{\ln|2|t}{0.32}} dt \right)$$

$$D_{Res} = \frac{A_o}{r^2} (0.537 U(1 - e^{-0.095t_R}) + 0.024(1 - U)(1 - e^{-2.16t_R})) \quad (2.5)$$

donde U es la fracción de captación tiroidea post-tiroidectomía y t_R el tiempo en días que duran las restricciones. Para U se toma un valor conservativo de 0.05, siempre que la tiroidectomía sea casi total [USNRG 97].

Para los cálculos de los pacientes hospitalizados, se considerara 2 días de aislamiento desde la administración del ^{131}I , dado que se considera que el paciente retiene el 20% de la actividad administrada durante este tiempo; esta última estimación se realizó usando una vida media biológica de 6-7 días para ^{131}I [BA 08]. Con estos días de aislamiento, la dosis recibida por el familiar en el periodo de restricción inicia 48 horas después de la administración del tratamiento, es decir 40 horas (1.66d) después de la finalización del periodo de pre-equilibrio, quedando la relación como:

$$D_{Res} = 0.965A_o \frac{\Gamma}{r^2} \left(U \int_{1.66d}^{t_R} e^{-\frac{\ln|2|t}{7.3}} dt + (1 - U) \int_{1.66d}^{t_R} e^{-\frac{\ln|2|t}{0.32}} dt \right)$$

$$D_{Res} = \frac{A_o}{r^2} (0.537 U(0.854 - e^{-0.095t_R}) + 0.024(1 - U)(0.027 - e^{-2.16t_R})) \quad (2.6)$$

⁷Esta componente, se refiere a todo el ^{131}I ubicado fuera de la glándula tiroides.

□ Periodo sin restricción:

Es el tiempo durante el cual el paciente ya no presenta ningún cambio en su habitual modo de vida y en su cuerpo aun presenta actividad del ^{131}I administrado, que pueda conllevar a la exposición radioactiva de cualquier persona a su alrededor.

De manera similar a la expresión del período anterior, en éste se tiene una contribución tiroidal y otra extratiroidal, obteniendo la misma relación para el cálculo de la dosis en aire recibida por el familiar durante el periodo sin restricción, D_{SRes} , con la gran diferencia que aquí se integra desde el final del periodo de restricción, t_R , hasta el decaimiento total de la fuente, es decir hasta infinito:

$$D_{SRes} = 0.965A_o \frac{\Gamma}{r^2} \left(U \int_{t_R}^{\infty} e^{-\frac{\ln|2|t}{7.3}} dt + (1 - U) \int_{t_R}^{\infty} e^{-\frac{\ln|2|t}{0.32}} dt \right)$$

$$D_{SRes} = \frac{A_o}{r^2} (0.537Ue^{-0.095t_R} + 0.0236(1 - U)(e^{-2.16t_R})) \quad (2.7)$$

Ahora, dado que el modelo considera las interacciones sociales del paciente, cada periodo de tiempo viene acompañado de un factor de ocupación (FO), que indica la fracción de tiempo que el familiar al cuidado está cerca del paciente. De esta manera la dosis total en aire, D_{Ta} , recibida por un individuo cerca de un paciente tratado con ^{131}I , está dada como:

$$D_{Ta} = FO_{pre}D_{pre} + FO_{Res}D_{Res} + FO_{SRes}D_{SRes} \quad (2.8)$$

Donde: FO_{pre} , FO_{Res} , FO_{SRes} , son los factores de ocupación de los periodos de pre equilibrio, restricción y sin restricción, respectivamente. Para facilidad en la selección de los factores de ocupación de cada periodo, el modelo considera que la distancia del paciente al familiar puede ser 1m o infinito.

Retomando, la dosis en aire que recibe el familiar al cuidado del paciente depende de cinco variables: los factores de ocupación, la fracción de captación tiroidea, el tiempo de

restricciones, la actividad administrada, la vida media extratiroidal y tiroidal del ^{131}I y la distancia del familiar al paciente.

2.2.3. Factores de ocupación

En la siguiente tabla, se muestran los factores de ocupación sugeridos por la literatura [USNRG 97] [WA 06] [ICRP 88] junto con las características que se requieren, para la aplicación de cada uno en los periodos indicados previamente.

Tabla 2.3. Características de los factores de ocupación, manejados usualmente.

FO	Características
0.125	Es usado si el paciente vive solo y tiene pocas visitas.
0.25	Considera una convivencia conservadora, en general se asigna al período de restricción si el paciente: <ul style="list-style-type: none"> • Mantiene una distancia prudente de los otros • Duerme solo en un cuarto • No viaja en transporte público • No viaja en automóvil con otros durante un tiempo prolongado tiempo • Toma líquidos en gran cantidad
0.5	Toma las mismas consideraciones del factor de 0.25, con la diferencia de que el paciente duerme acompañado.
0.75	Es asignado a todo paciente durante el periodo de pre equilibrio. Se toma en cuenta que durante este lapso el paciente viaja a su casa desde el hospital, generalmente acompañado por el familiar que le cuida.

Cabe resalta que todos los FO mencionados previamente son una sugerencia, dado que su aplicación a los períodos de tiempo para cada paciente es criterio del médico, basado en las condiciones de vivienda específicas de cada paciente. En muchos casos el paciente puede permanecer solo, de manera que el $FO = 0$, o puede necesitar de ayuda todo el tiempo en cuyo caso $FO = 1$.

2.2.4. Clasificación socioeconómica de los familiares

Para un mejor análisis de los factores que predominan en la exposición de los familiares a la radiación proveniente del paciente, la población estudiada se dividió inicialmente de acuerdo con la actividad suministrada al paciente y posteriormente a las condiciones de vivienda y socioeconómicas expuestas en la encuesta realizada (Ver Apéndice C). Para esta última clasificación se realizaron tres grupos A, B y C, en su orden, de las condiciones más a las menos idóneas para la convivencia con un paciente tratado con radionúclidos. Cada familiar fue vinculado al grupo que mejor representaba sus condiciones particulares, en especial para la categoría C, el presentar cualquiera de sus características, era suficiente para ser clasificado en ésta.

A continuación se muestran las condiciones tenidas en cuenta para la clasificación, dentro de cada grupo:

□ Grupo A

- No presentar cercanía con niños ni con adultos durante 15 días.
- Contar con un dormitorio propio
- Tener un baño propio
- Usar vehículo privado o público (Taxi) durante menos de 1 hora⁸, para el transporte del Hospital a su vivienda.

⁸De acuerdo con la relación 2.8, para una actividad administrada de 100 mCi, 1 hora en el periodo de pre equilibrio a una distancia de 50 cm, el familiar recibe una dosis en tejido de 1 mSv.

❑ Grupo B

- No presentar cercanía con niños durante 8 días, ni con adultos durante 3 días.
- Contar con dormitorio propio o dormir en una cama separada de las demás por una distancia mayor a 1m.
- Tener baño propio fuera de su recámara o compartido solo con una persona.
- Usar vehículo privado o público (Taxi) durante menos de 2 horas⁹, para el transporte del Hospital a su vivienda.

❑ Grupo C

- Presentar cercanía con niños (menores de 15 años) y adultos los primeros días tras la administración del ¹³¹I
- Tener un dormitorio compartido
- Usar baño compartido
- Transportarse a su lugar de residencia mediante autobuses públicos (metro/microbuses) o con una duración mayor a 2 horas.
- Presencia de alguna discapacidad física o mental.

2.3. Contribución a la dosis externa recibida por los pacientes a causa de las condiciones de hospitalización.

El departamento de medicina nuclear del INCan cuenta con dos cuartos para la hospitalización de pacientes con CDT tratados con ¹³¹I. Cada cuarto está compuesto de tres camas separadas por una distancia de 1m como se esquematiza en la figura 4.5. Además cuentan con cinco botes de basura, dos grandes de color rojo destinados para la ropa y los desechos orgánicos, los tres restantes son pequeños de color negro, cuya único uso es destinado a vomito o flemas que cada paciente pueda presentar.

⁹De acuerdo con la relación 2.8, para una actividad administrada de 100 mCi, 2 horas en el periodo de pre equilibrio a una distancia de 50 cm, el familiar recibe una dosis en tejido de 1.9 mSv.

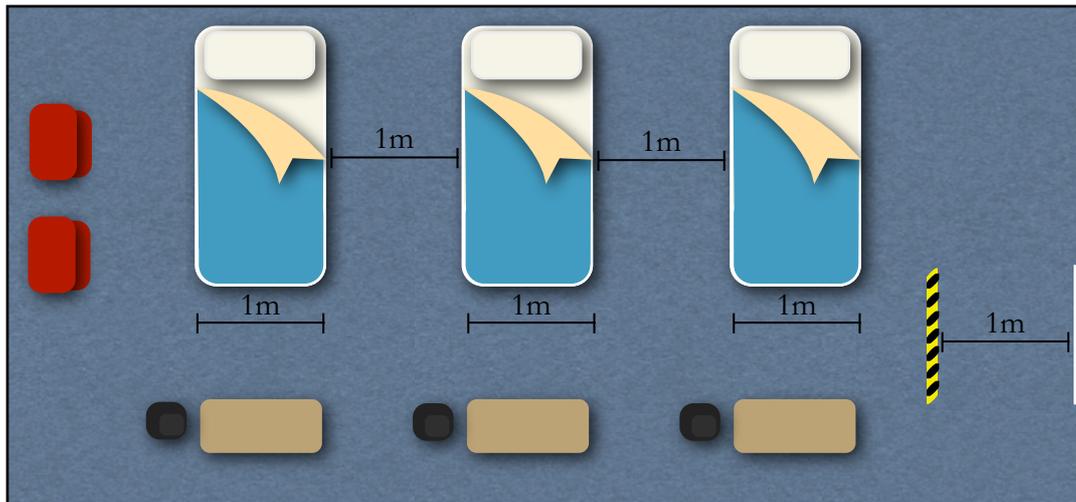


Figura 4.5. Cuarto de hospitalización de los pacientes tratados con ^{131}I

Con el propósito de conocer la dosis que recibe cada paciente durante los días de hospitalización a causa de sus compañeros de cuarto, a quienes también se les ha administrado ^{131}I , se ubicaron portadosímetros en camas vacías, simulando las posibles circunstancias que se puedan presentar:

- Se dejó la cama del centro sin paciente, pero con un portadosímetro ubicado a la altura del pecho (80cm desde el borde superior de la cama), el cual permite medir la dosis que recibe un paciente como consecuencia de la actividad administrada a sus compañeros de cuarto. Cada medida se realizó con pacientes a quienes se les administro igual cantidad de actividad ya sea 100, 150 ó 200 mCi.
- Se ocupó solo una de las camas laterales y se ubicaron dosímetros en las dos restantes, en la misma posición de las circunstancias descritas previamente, para cada una de las actividades que son dadas a los pacientes 100, 150 y 200 mCi, logrando medir la dosis que recibe un paciente a causa de cada uno de los pacientes con los que comparte el cuarto.

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1. Homogeneidad de los DTL

Con el objetivo de aumentar la precisión en las medidas, la R_{TL} obtenida con cada uno de los dosímetros del lote, se modificó por su respectivo factor de corrección (C_{ij}) calculado a partir de la ecuación 2.2 después de irradiar tres veces cada dosímetro. En la Figura 3.1 se muestran los valores de la R_{TL} para cada dosímetro, luego de ser sometidos a una misma dosis de radiación, antes y después de aplicar los factores de corrección.

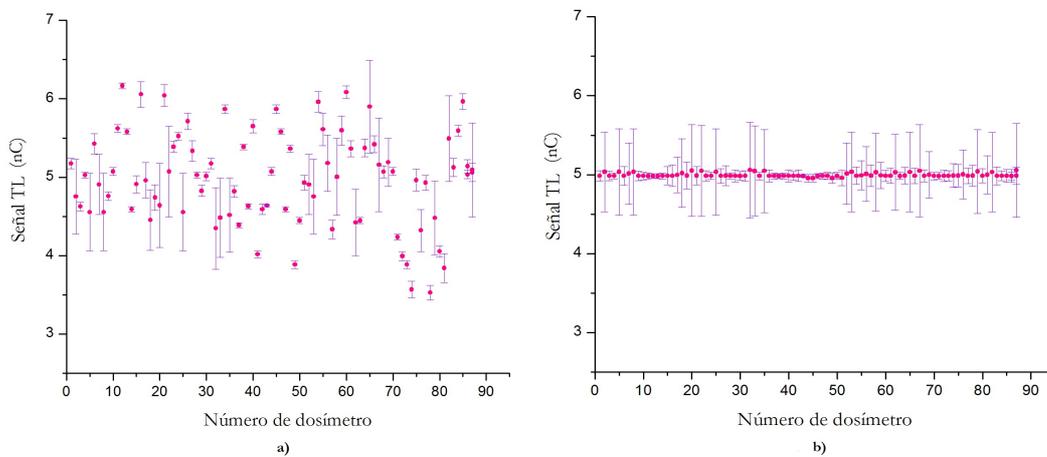


Figura 3.2. R_{TL} a) Antes de aplicar el factor de corrección, b) después de aplicar el factor de corrección, para cada dosímetro.

La desviación estándar de los valores de las señales TL respecto al valor medio de las señales TL del lote, sin aplicar los factores de corrección fue del 60% y aplicándolos del 3% logrando un cambio favorable en la homogeneidad del lote (Figura 3.1.b). En este caso el valor promedio de la R_{TL} es igual a $5 \mu C$ correspondiente a la dosis a la que

fueron expuestos los dosímetros ante radiación beta proveniente de una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

3.2. Reproducibilidad de los DTL

Durante el proceso de obtención del factor de corrección, cada dosímetro del lote fue irradiado a un mismo valor de dosis tres veces, permitiendo evaluar la reproducibilidad de cada uno. En el Apéndice D, se muestran los promedios de las respuestas TL obtenidas para cada dosímetro, junto con su correspondiente desviación estándar. Se encontró que la incertidumbre por reproducibilidad del lote de dosímetros utilizado, es del 10%.

3.3. Calibración de los DTL

Luego de la irradiación de los dosímetros en el ININ con una fuente de ^{137}Cs a cinco valores de kerma en aire (K_a) conocidos para su calibración, como se describió en la sección 2.4, los dosímetros fueron transportados al IFUNAM donde se leyeron bajo las condiciones apropiadas en el laboratorio de dosimetría. De la curva de brillo obtenida para cada dosímetro se seleccionó el pico principal que se encuentra generalmente entre 150 y 350 °C (ver Figura 3.2.b), tomando el área bajo la curva de esta región como el valor de la respuesta TL (R_{TL}) medida. Posteriormente a cada valor de R_{TL} se aplicó el correspondiente factor de corrección para finalmente promediar los valores de los dosímetros irradiados a la misma dosis en aire y obtener los valores mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.4. Valores de respuesta TL, para cada uno de los valores de kerma en aire a los que fueron expuestos los dosímetros.

K_a (mGy)	R_{TL} (nC)
0.5	9.43 ± 0.30
1.25	24.10 ± 0.32
2	42.02 ± 0.56
2.75	57.00 ± 0.23
3.5	78.50 ± 0.38

En la Figura 3.2.a, se muestra la gráfica de la R_{TL} en función de los valores de dosis a los que fueron irradiados, junto al ajuste lineal por mínimos cuadrados que se aplicó.

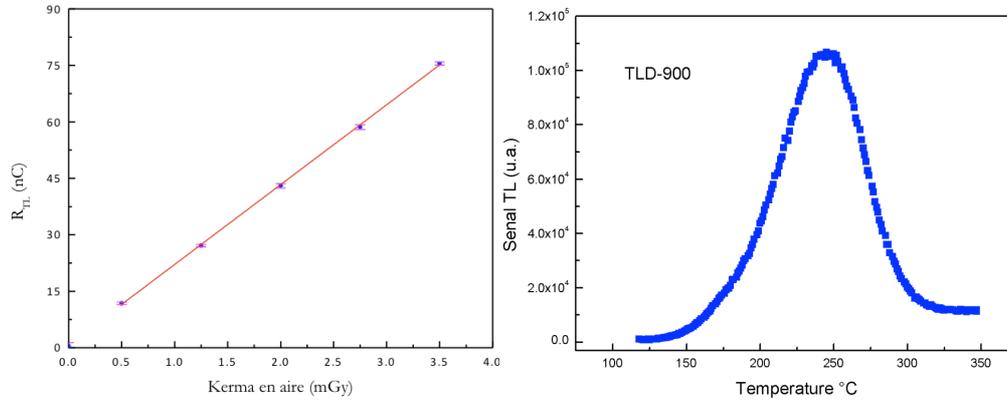


Figura 3.3. a) Curva de calibración para los TLD-900, utilizando una fuente de ^{137}Cs . b) Pico principal de la curva de brillo de TLD-900.

La relación que se obtuvo, tras el ajuste lineal con un coeficiente de correlación del 0.996 fue:

$$R_{TL} = (21.20 \pm 0.15)K_a + (0.90 \pm 0.30) \quad (3.1)$$

donde R_{TL} , es la respuesta TL de cada dosímetro y K_a , el kerma en aire. Al expresar esta relación en función de la dosis absorbida en tejido mediante la ecuación 1.12, se tiene:

$$R_{TL} = (21.20 \pm 0.15) \frac{(\mu_{en}/\rho)_{aire} D_{tejido}}{(\mu_{en}/\rho)_{tejido}} + (0.90 \pm 0.30) \quad (3.2)$$

Ahora, la dosis en tejido se multiplica por el factor de calidad del tipo de radiación $W_R = 1$, porque se trata de fotones y por el factor de calidad de ponderación por el tipo de tejido u órgano que en este trabajo se toma como $W_T = 1$ ya que consideramos dosis a cuerpo entero obteniendo así el valor de Dosis Efectiva, E (aplicando la ecuación 1.13)

$$E = D_{tejido} \times W_R \times W_T$$

Y entonces la relación entre dosis efectiva y respuesta TL, es:

$$E = \left(\frac{R_{TL} - (0.90 \pm 0.30)}{(21.20 \pm 0.15)} \right) \times \frac{(\mu_{en/\rho})_{tejido}}{(\mu_{en/\rho})_{aire}} \quad (3.3)$$

3.4. Dosis efectiva recibida por familiares al cuidado de pacientes con CDT.

Los portadosímetros usados por los familiares de los pacientes con CDT durante quince días, se leyeron en el IFUNAM aproximadamente 24 horas después de ser entregados por el familiar, junto con su correspondiente “portadosímetro testigo”, siguiendo el protocolo descrito en la sección 2.2.1. Este último portadosímetro, permaneció en una zona del INCan libre de fuentes radioactivas, durante los mismos días que el portadosímetro principal fue usado por el familiar, registrando la radiación ambiental y la contribución debida al transporte del IFUNAM al INCan y viceversa.

De manera similar al procedimiento realizado con las curvas de brillo de los dosímetros utilizados en la calibración, el portadosímetro de cada familiar contenía 4 dosímetros TLD-900, cuyas señales TL fueron promediadas, luego de seleccionar el área bajo la curva del pico principal y aplicar a cada valor el correspondiente factor de corrección, para finalmente con este valor y la relación 3.2, calcular la dosis efectiva (E) recibida por cada familiar.

En las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, se muestra la dosis efectiva (E) recibida por cada uno de los familiares al cuidado de pacientes con CDT que han sido tratados de manera ambulatoria, es decir para aquellos cuyo egreso del hospital se realizó inmediatamente después de la administración del ^{131}I , en función de las actividades administradas al paciente.

Tabla 3.5. Dosis efectiva recibida por los familiares de los pacientes ambulatorios, a quienes se les administró una actividad de 100 mCi.

Familiar	R _{TL} (nC)	E (mSv)
16	6.34 ± 0.75	0.28 ± 0.03
17	5.38 ± 0.46	0.23 ± 0.02
18	26.61 ± 0.41	1.33 ± 0.02
21	6.91 ± 0.35	0.31 ± 0.01
23	25.76 ± 0.74	1.29 ± 0.04
26	2.75 ± 0.14	0.10 ± 0.01
38	4.64 ± 0.21	0.19 ± 0.01
39	16.17 ± 0.89	0.80 ± 0.04

Tabla 3.6. Dosis efectiva recibida por los familiares de los pacientes ambulatorios, a quienes se les suministró una actividad de 150 mCi.

Familiar	R _{TL} (nC)	E (mSv)
19	37.89 ± 0.45	1.92 ± 0.02
20	4.01 ± 0.17	0.16 ± 0.01
22	73.13 ± 0.61	3.74 ± 0.03
24	25.76 ± 0.10	1.64 ± 0.01
25	32.56 ± 0.65	0.34 ± 0.03
34	7.41 ± 0.08	0.91 ± 0.01
35	2.75 ± 0.09	0.16 ± 0.01
36	70.11 ± 0.48	0.25 ± 0.04
37	23.24 ± 0.52	0.21 ± 0.02
40	17.65 ± 0.37	0.18 ± 0.01

Tabla 3.7. Dosis efectiva recibida por los familiares de los pacientes ambulatorios, a quienes se les suministró una actividad de 200 mCi.

Familiar	R _{TL} (nC)	E (mSv)
27	70.11 ± 0.81	3.59 ± 0.04
33	2.56 ± 0.14	0.25 ± 0.01

De manera similar, la dosis efectiva recibida por cada uno de los familiares al cuidado de los pacientes hospitalizados, es decir de los que permanecieron en las instalaciones del hospital durante 48 horas después de la administración del ^{131}I , se muestran en las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7 para una actividad administrada de 100, 150 y 200 mCi, respectivamente.

Tabla 3.8. Dosis efectiva recibida por los familiares al cuidado de pacientes hospitalizados, luego de la administración de 100 mCi.

Familiar	R_{TL} (nC)	E (mSv)
1	68.58 ± 1.68	3.51 ± 0.09
2	2.57 ± 0.36	0.09 ± 0.01
3	3.55 ± 0.11	0.14 ± 0.01
4	1.56 ± 0.15	0.04 ± 0.01
7	2.79 ± 0.16	0.10 ± 0.01
10	3.10 ± 0.46	0.12 ± 0.02
13	2.45 ± 0.09	0.08 ± 0.01
14	2.59 ± 0.32	0.09 ± 0.01
15	4.77 ± 0.19	0.20 ± 0.01
29	17.65 ± 1.50	0.87 ± 0.07
32	1.88 ± 0.07	0.05 ± 0.01

Tabla 3.9. Dosis efectiva recibida por los familiares al cuidado de pacientes hospitalizados durante tres días, luego de la administración de 150 mCi.

Familiar	R_{TL} (nC)	E (mSv)
5	3.40 ± 0.19	0.13 ± 0.01
8	2.39 ± 0.43	0.08 ± 0.01
9	2.27 ± 0.23	0.07 ± 0.01
11	2.96 ± 0.14	0.11 ± 0.01
12	2.56 ± 0.19	0.09 ± 0.01
30	3.67 ± 0.15	0.15 ± 0.01
31	0.98 ± 0.18	0.01 ± 0.01

Tabla 3.10. Dosis efectiva recibida por los familiares al cuidado de pacientes hospitalizados, luego de la administración de 200 mCi.

Familiar	R_{TL} (nC)	E (mSv)
6	2.96 ± 0.28	0.11 ± 0.01
28	23.24 ± 1.55	1.16 ± 0.08

En la Tabla 3.8, al asociar los familiares cuidadores de cada grupo (Ambulatorios y Hospitalizados) por intervalo de dosis recibida, se evidencia que el 90% de los familiares de pacientes hospitalizados y el 70% de los ambulatorios reciben menos de 1mSv; el 95% y 90%, respectivamente, menos de 2 mSv.

Tabla 3.11. Número de familiares cuidadores por intervalo de dosis efectiva para cada grupo.

E (mSv)	Familiares Cuidadores	
	Grupo I (No. de casos 20)	Grupo II (No. de casos 20)
<0.5	17	11
0.5-1.0	1	3
1.0-1.5	1	2
1.5-2.0		2
3.5-4.0	1	2

Tabla 3.12. Dosis efectiva personal máxima, mínima y media recibida por los familiares de los pacientes de cada grupo.

E (mSv)	Familiares Cuidadores	
	Grupo I (No. de casos 20)	Grupo II (No. de casos 20)
Máxima	3.51	3.74
Mínima	0.05	0.10
Media	0.38	0.90

En la Tabla 3.9, se muestra la dosis media recibida por cada grupo, siendo el valor del grupo I aproximadamente el 40 % del valor del grupo II. Sin embargo a diferencia de estos valores, las dosis efectivas máximas y mínimas recibidas por los grupos, no muestran tal diferencia, indicando que la modalidad de hospitalización no es un factor determinante en la limitación de la dosis recibida por el familiar cuidador, dado que el familiar al cuidado de un paciente hospitalizado puede recibir la misma cantidad de dosis tanto máxima como mínima que recibe el familiar al cuidado de un paciente ambulatorio.

A pesar de que las condiciones socioeconómicas de país a país varían significativamente, las dosis efectivas medidas en nuestro estudio para el caso de ambulatorios son similares a las reportadas por Monsieurs *et al.* [MO 98], quienes indican que la dosis a familiares de pacientes ambulatorios son de 0.78 mSv (intervalo: 0,00-6,00 mSv) y 0.80 mSv (intervalo: 0,07-2.11 mSv) en grupos que se distinguen por la duración de la restricción de dormir en cama separadas.

3.4.1. Dosis efectiva recibida por los familiares en función de las condiciones socioeconómicas.

En la Tabla 3.10. cada uno de los familiares dentro de su respectivo grupo I ó II, fué clasificados en tres categorías de acuerdo con sus condiciones socioeconómicas, como se explicó en la sección 2.2.3. De la Tabla se observa que la categoría C está constituida por los familiares que reciben las dosis efectivas más altas de cada grupo, constituyendo el 15% de todos los familiares. En la Tabla 3.11, se muestran los valores de la dosis máxima, mínima y media, recibida por los familiares de cada categoría, permitiendo observar que las dosis efectiva son más altas para el grupo II que para el grupo I y además que la dosis recibidas por los familiares para ambos grupos va en aumento con la categoría de clasificación.

Las dosis efectivas medias de las categorías A y B, de cada grupo en relación a la de la categoría C, no varían sustancialmente, siendo entonces los factores que determinan la clasificación en la categoría C determinantes en la exposición de los familiares cuidadores.

De las características mostradas en la sección 2.2.3, para la inclusión de los familiares en la categoría C, de acuerdo con la información suministrada en la encuesta, los factores más sobresalientes fueron la duración del transporte del hospital a su vivienda tras su egreso y la presencia de alguna discapacidad física y/o mental. Esto fue claro para el caso de pacientes que cumplían con todas las características de la categoría A, pero presentaban alguna discapacidad o su vivienda se encontraba demasiado alejada del hospital, con una duración mayor a 3 horas.

Se observó que el hecho de compartir el baño, no es un factor determinante para aumentar la exposición del familiar, dado que las personas que cumplían todas las condiciones de A, con la excepción del baño, no presentaron una dosis muy superior a la media del grupo A.

Tabla 3.13. Clasificación de los familiares de acuerdo con sus condiciones de vivienda y socioeconómicas.

E (mSv)	Familiares Cuidadores					
	Grupo I (No. de casos 20)			Grupo II (No. de casos 20)		
	A (N ¹⁰ =10)	B (N=7)	C (N=3)	A (N=8)	B (N=9)	C (N=3)
<0.5	10	7		8	4	
0.5-1.0			1		2	
1.0-1.5			1		2	
1.5-2.0					1	1
2.0-2.5						
2.5-3.0						
3.0-3.5			1			
3.5-4.0						2

Tabla 3.14. Dosis efectiva máxima, mínima y media, recibida por los familiares de acuerdo con la clasificación de las condiciones de vivienda y socio-económicas.

E (mSv)	Familiares Cuidadores					
	Grupo I (No. de casos 20)			Grupo II (No. de casos 20)		
	A (N=10)	B (N=7)	C (N=3)	A (N=8)	B (N=9)	C (N=3)
Máxima	0.11	0.20	3.51	0.25	1.64	3.75
Mínima	0.05	0.09	0.87	0.10	0.23	1.92
Media	0.07	0.13	1.85	0.22	0.78	3.08

Aunque no se tuvo en cuenta como una característica que delimitara la selección de los familiares en cada grupo, la encuesta también hacía referencia al nivel de estudios que había cursado y en la mayoría de los casos esto se vio reflejado en los cuidados que tenían con el paciente, pues en la bitácora suministrada, las anotaciones de las actividades

¹⁰ Número de casos

y cuidados que se habían tenido con el paciente, resultaban ser más claras y apropiadas de acuerdo con lo indicado en el INCAN antes de darle de alta, a las personas que presentaban un mayor nivel de estudios. Esto sin mencionar que eran más conscientes de los propósitos de este estudio.

Otro de los factores importantes a tener en cuenta en la exposición del familiar, según la literatura [O'D 93] [MO98], sería el hecho de compartir la cama durante los días del tratamiento. Dado que en este trabajo todos los pacientes vinculados durmieron en camas separadas por lo menos durante 8 días, este factor no se pudo evaluar en la exposición a los familiares.

3.4.2. Dosis efectiva recibida por los familiares en función de la actividad administrada al paciente.

La Tabla 3.12, resume la información de las Tablas presentadas previamente, se muestra la dosis efectiva máxima, mínima y media recibida por los familiares en relación a la cantidad de actividad administrada al paciente. En esta Tabla para el grupo I no se ve dependencia de la dosis efectiva recibida por los familiares con la actividad administrada, a diferencia de la que se observa en el grupo II.

Tabla 3.15. Dosis efectiva personal recibida por los familiares, de acuerdo con la actividad administrada a los pacientes.

Actividad administrada (mCi)	Familiares cuidadores			
	Grupo I		Grupo II	
	N	E (mSv)	N	E (mSv) ¹¹
100	11	0.04-3.51 (0.48)	8	0.10-1.33 (0.60)
150	7	0.01-0.15 (0.09)	10	0.15-3.75 (0.95)
200	2	0.11-1.16 (0.63)	2	0.25-3.60 (1.91)

Sin embargo dado que en la Tabla 3.12 no se hace distinción entre los familiares por su categoría (situación socio-económica y de transporte) y que en la sección previa se observo que esta distinción influencia fuertemente la dosis recibida por el familiar, con

¹¹Intervalo y promedio de la Dosis efectiva recibida por cada uno de los familiares de pacientes que recibieron una misma actividad y fueron tratados bajo la misma modalidad de egreso.

esta Tabla no se puede inferir si hay o no dependencia de la dosis recibida por el familiar con la actividad administrada al paciente. Con el fin de evitar la probable dependencia de la categoría del familiar, en la Tabla 3.13 se presenta la dosis efectiva media recibida por los familiares de cada categoría de acuerdo con la actividad administrada al paciente. Los espacios en blanco se deben a que ninguno de los familiares vinculados a este estudio presentó esas características específicas.

Tabla 3.16. Dosis efectiva recibida por los familiares de cada categoría en función de la actividad administrada al paciente

Actividad administrada (mCi)	E (mSv)					
	Grupo I (No. de casos 20)			Grupo II (No. de casos 20)		
	A (N=10)	B (N=7)	C (N=3)	A (N=8)	B (N=9)	C (N=3)
100	0.06	0.13	2.19	0.15	0.71	
150	0.07	0.14		0.22	1.28	2.83
200	0.11		1.16	0.25		3.59

En la Tabla 3.13, se observa una dependencia de la dosis efectiva recibida por el familiar con la actividad para todas las categorías con excepción de la C del grupo de los hospitalizados. Esta excepción se debe a que en el caso específico de la categoría C del grupo I con una actividad para tratamiento de 100 mCi, se tuvieron solo dos familiares de los cuales uno estaba a cargo de los cuidados de un paciente en situación delicada, requiriendo ayuda para realizar varias actividades como: comer, caminar y cambiar periódicamente la cánula. Siendo el único paciente de este tipo vinculado al estudio, la dosis efectiva recibida por su familiares fue demasiado alta en relación a las recibidas por los demás familiares de la categoría C y, por ende, de las recibidas por todos los familiares del grupo I. La dosis efectiva recibida por el otro familiar, que cumple las mismas características requeridas en la Tabla fue de 0.87 mSv, de manera que en esta categoría, sin tomar en cuenta el caso especial, se observa al igual que para demás las categorías una dependencia de la dosis efectiva recibida por el familiar con la actividad administrada. De manera que tanto para los ambulatorios como los hospitalizados hay una dependencia de la dosis efectiva recibida por los familiares con la actividad administrada al paciente.

Esta dependencia es menor para los pacientes hospitalizados que para los ambulatorios, dado que en el momento de su egreso, 48 horas después de la toma del ^{131}I , de acuerdo con la literatura [DR 01] solo tienen el 20% de la actividad administrada, empezando la interacción con su familiar con este porcentaje de actividad. Mientras que en el caso de los ambulatorios es diferente, ya que la interacción con el familiar inicia desde la administración del radionúclido, es decir con la totalidad del material radioactivo.

3.4.3. Análisis Estadístico de los Resultados

Se realizó un análisis estadístico de los valores obtenidos de la dosis recibida por los familiares de los pacientes tratados con ^{131}I . Todos los valores se capturaron en una base de datos, usando el software Statistical Package for the Social Sciences (SSPS 20) [SPSS 11], agrupándolos en hospitalizados y ambulatorios. Para cada variable se calculó la estadística descriptiva y se desarrollaron pruebas de normalidad para poder aplicar tanto el Análisis de Varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) como el análisis de comparaciones múltiples [GL 96].

Inicialmente, se realizó una prueba T-Student para conocer si existían diferencias significativas entre la dosis recibida por los familiares de pacientes tratados con ^{131}I que son egresados ambulatoriamente con respecto a los que son hospitalizados y dado que no se encontró diferencia significativa entre estos grupos (valor $p > 0.05$, Tabla 3.14) se realizó un análisis de una vía (ANOVA), para observar si entre las categorías asociadas a las condiciones socioeconómicas de vivienda y de transporte de cada paciente (A, B, C), existían diferencias significativas.

Tabla 3.17. Prueba T-Student, para los grupos hospitalizados y ambulatorios, en relación a la dosis recibida por cada familiar.

Prueba T-Student				
Factor	Grupos	N	Medias	p
Dosis	Hospitalizados	20	0.358	0.085
	Ambulatorios	20	0.894	

Tabla 3.18. ANOVA, para las categorías A, B y C, en relación a la dosis recibida por los familiares pertenecientes a cada una.

ANOVA				
Factor	Grupos	N	Medias	p
Dosis	Categoría A	18	0.128	0.001
	Categoría B	16	0.498	
	Categoría C	6	2.465	

Con el ANOVA se observa que sí hay diferencia significativa entre las categorías A, B y C ($p > 0.05$, Tabla 3.15) y para conocer cuál o cuáles de estas categorías eran las que diferían, inicialmente se realizó la prueba de homogeneidad de varianza (Prueba de Levene) y dado que se encontró diferencia significativa entre la varianza de los grupos ($p < 0.05$, Tabla 3.16), se procedió a hacer la prueba de Tamhane. Esta última prueba mostró que sí hay diferencia significativa entre todas las categorías ($p < 0.05$, Tabla 3.17).

Tabla 3.19. Prueba Levene, para las categorías A, B y C, en relación a la dosis recibida por los familiares pertenecientes a cada una.

Prueba Levene				
Factor	Grupos	N	Medias	p
Dosis	Categoría A	18	0.128	0.001
	Categoría B	16	0.498	
	Categoría C	6	2.465	

Tabla 3.20. Prueba Tamhane, para las categorías A, B y C, en relación a la dosis recibida por los familiares pertenecientes a cada una.

Tamhane		
Grupos		p
Categoría A	Categoría B	0.038
	Categoría C	0.021
Categoría B	Categoría A	0.038
	Categoría C	0.039
Categoría C	Categoría A	0.021
	Categoría C	0.039

Los resultados de este análisis estadístico refuerzan las ideas planteadas en el análisis de los datos mostrado en las secciones previas de este mismo capítulo. El ANOVA reveló que no hay diferencia significativa entre la dosis recibida por los familiares de los pacientes que son hospitalizados y la recibida por los familiares de los pacientes tratados

de manera ambulatoria. Esto permite argumentar que la modalidad de egreso no es un factor determinante en la dosis recibida por el familiar.

Posteriormente la prueba Tamhane permitió observar que todas las categorías tenían diferencia estadística entre sí, de manera que, a diferencia de la modalidad de egreso, las condiciones socio-económicas respecto de vivienda y transporte de cada paciente son factores determinantes en la dosis recibida por el familiar.

3.5. Cálculos teóricos de las dosis efectivas recibidas por los familiares al cuidado de los pacientes

La dosis en aire se calculó teóricamente a partir de la relación 2.8 tomando las respectivas consideraciones para cada modalidad de egreso y posteriormente mediante la relación 1.12 se calculó la dosis efectiva recibida por los familiares de los pacientes ambulatorios y hospitalizados, para cada una de las categorías y posibles actividades de tratamiento.

En la Tabla 3.18 se muestran los factores de ocupación usados para cada periodo y categoría de las modalidades de egreso. Para los familiares de los pacientes hospitalizados durante el periodo de pre-equilibrio se tomó un $FO = 0$, dado que durante este periodo los pacientes permanecen en la sala de hospitalización y para los ambulatorios solo se tomó en cuenta la duración del viaje a la casa, recordado que el periodo de pre-equilibrio dura solo 8h; para el periodo sin restricción se tomaron valores de 0.25 y 0.5, dado que se supone ha retornado a su estilo de vida habitual y no requieren de cuidados que aumenten la interacción con su familiar. Para el resto de FO usados, se consideraron las características de inclusión de cada categoría junto con las sugerencias de FO mostradas en la sección 2.2.2.1.

Tabla 3.21. Factores de ocupación usados para el cálculo de las dosis efectivas recibidas por los familiares cuidadores.

	Hospitalizados			Ambulatorios		
	A	B	C	A	B	C
FO_{pre}	0.00	0.00	0.00	0.125	0.25	0.5
FO_{Res}	0.00	0.125	0.125	0.00	0.125	0.125
FO_{SRes}	0.125	0.25	0.50	0.125	0.25	0.5

En la Tabla 3.19, se presentan los valores teóricos de las dosis efectivas que reciben familiares al cuidado de pacientes ambulatorios y hospitalizados. Estos cálculos se realizaron para cada categoría (A, B, C) de acuerdo con sus respectivas características (sección 2.2.3) y para cada una de las posibles actividades administradas al paciente: 100, 150 o 200 mCi de ^{131}I .

Tabla 3.22. Dosis efectiva calculada que recibirían los familiares de pacientes hospitalizados y ambulatorios, de acuerdo con su situación socioeconómica.

Actividad Administrada (mCi)	E(mSv)					
	Hospitalizados			Ambulatorios		
	A	B	C	A	B	C
100	0.09	0.41	0.77	0.33	1.07	0.96
150	0.13	0.62	1.15	0.49	1.86	2.84
200	0.18	0.82	1.54	0.65	2.48	3.79

Es arriesgado hacer una comparación entre los datos obtenidos experimentalmente con los valores teóricos, dado que para el cálculo de estos últimos se toman constantes tanto empíricas como experimentales pero relativas a otras poblaciones, incluyendo cambios sutiles en el tratamiento dado al paciente (sección 2.2.2.), pudiendo ocasionar diferencias significativas entre los valores calculados teóricamente y los obtenidos experimentalmente.

Se observa que en general los cálculos teóricos sobrestiman las dosis efectivas recibidas por los familiares, en porcentajes que varían entre 0 (categoría C, ambulatorio, 150 mCi) y 350% (categoría B, hospitalizados, 150 mCi). La única excepción es el caso especial del paciente con discapacidad física (categoría c, hospitalizados 100 mCi) en que el cálculo subestima la dosis efectiva recibida por el familiar en un 73%.

Estos resultados teóricos se encontraron considerando pacientes promedio y, en el caso de pacientes con discapacidades es necesario utilizar FO más grandes lo que acercaría el valor teórico al experimental. Es conveniente notar que en las categorías en que sólo hay un familiar (categoría C, hospitalizado, 200 mCi y categoría C, ambulatorio, 150 mCi) el cálculo teórico da 2% mayor e idéntico al medido, respectivamente.

Tabla 3.23. Dosis recibida por un paciente a causa de sus dos compañeros de cuarto, de acuerdo con la actividad que les es administrada.

Actividad ¹² (mCi)	E (mSv)
100	1.40 ± 0.03
150	2.18 ± 0.03

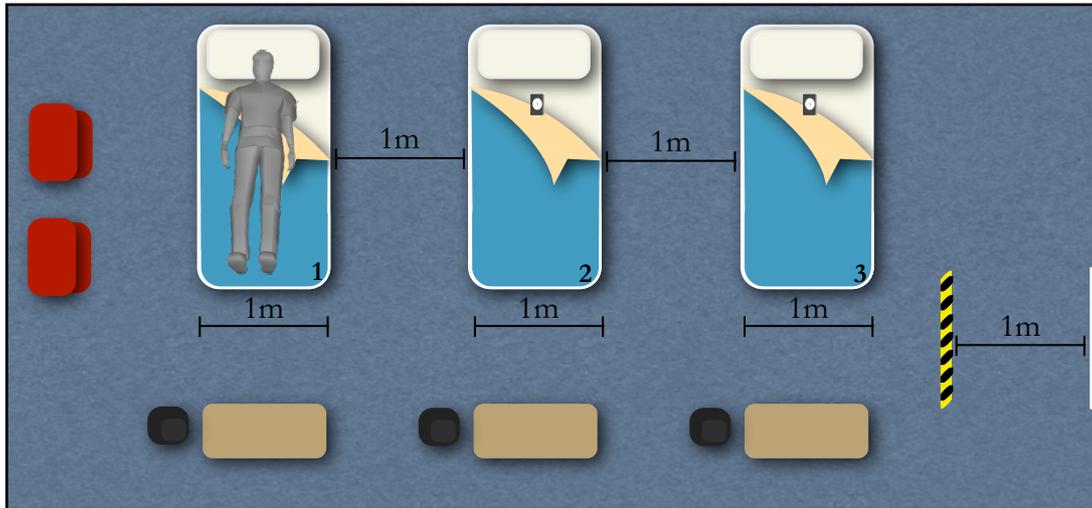


Figura 3.5. Ubicación de dosímetros, para el segundo conjunto de medidas en el cuarto de hospitalización

El segundo conjunto de medidas, se realizó con pacientes que usaron una de las camas laterales, ubicando portadosímetros en cada una de las dos camas restantes como se esquematiza en la Figura 3.4. Se tomaron medidas para tres pacientes a quienes se les había administrado 100, 150 y 200 mCi, obteniendo por cama las dosis que se muestran en la Tabla 3.21.

Tabla 3.24. Dosis recibida por un paciente a causa de sus compañeros de cuarto, de acuerdo con la actividad que les es administrada.

Actividad (mCi)	E (mSv)	
	Cama 2	Cama 3
100	0.95 ± 0.02	0.35 ± 0.02
150	1.14 ± 0.04	0.39 ± 0.01
200	1.25 ± 0.01	0.53 ± 0.02

¹²Se refiere a la actividad administrada a cada uno de los pacientes hospitalizados

Al comparar los valores obtenidos en cada conjunto de medidas, se observa que las dosis efectivas medidas con la primera configuración son más altas que las obtenidas con la segunda para una misma actividad dada. Esta diferencia se debe a que en la primera configuración hay contribución de dos pacientes y en la segunda solo de uno. Además se ve un aumento en la dosis efectiva recibida por cada paciente con la actividad de tratamiento administrada a sus compañeros y una disminución con el aumento de la distancia entre pacientes.

De las Tablas 3.20 y 3.21 se tiene que la máxima dosis efectiva que puede recibir un paciente en el cuarto de hospitalización a causa de sus dos compañeros es 2.18 ± 0.03 mSv y la mínima a causa de otro paciente en la cama contigua 0.95 ± 0.02 mSv y con separación de una cama 0.35 ± 0.02 mSv.

Capítulo 4. Conclusiones

Todas las dosis efectivas recibidas por los familiares vinculados a este estudio están dentro de los límites de dosis establecidos por la normativa mexicana y además por los recomendados tanto por el ICRP 103 como por la IAEA.

El 90% de los familiares de pacientes hospitalizados y el 70% de los ambulatorios reciben menos de 1 mSv; el 95% y 90%, respectivamente, menos de 2 mSv.

Las condiciones individuales de cada paciente con CDT tratado con ^{131}I son determinantes en la elección de la modalidad de egreso que debería ser usada.

La modalidad de hospitalización en relación a la ambulatoria, disminuye la exposición del familiar cuidador, pero incrementa la exposición del Personal Ocupacionalmente Expuesto, la cual es crítica, debido a la cantidad de pacientes tratados semanalmente en el INCan.

Las dosis efectivas recibidas por los familiares de las categorías A y B tanto de los hospitalizados, como de los ambulatorios es menor a 2 mSv, llegando a recibir dosis mayores sólo aquellos familiares que de acuerdo con las características de su paciente, son clasificados en la categoría C.

Este estudio ha demostrado que las recomendaciones de Protección Radiológica dadas a los pacientes en el INCan, son adecuadas para cumplir con la normativa mexicana

respecto de los límites de dosis establecidos así como con los sugeridos por el ICRP y la IAEA, sin importar la modalidad de egreso usada.

Las recomendaciones de Protección Radiológica que se dan antes del tratamiento con ^{131}I a los pacientes con CDT en presencia del familiar a su cuidado, de acuerdo con sus condiciones individuales, son factores indispensables en la limitación de la dosis recibida por los miembros de su familia.

Los pacientes con CDT que reciben radioyodo con actividades de hasta 200 mCi para su tratamiento, podrían ser egresados ambulatoriamente del hospital, siempre y cuando se les provean y se cumplan las adecuadas recomendaciones de protección radiológica.

Los cálculos teóricos, permiten dar un estimativo de la dosis efectiva recibida por los familiares tomando las consideraciones individuales de cada paciente variando los FO de cada periodo y así previamente al tratamiento valorar la pertinencia de la modalidad de egreso que debería ser usada.

Los pacientes aislados en los hospitales generan desechos y contaminan las superficies que ellos tocan, particularmente las áreas alrededor del baño y dado que todas las áreas necesitan ser descontaminadas y limpiadas rápidamente, para que otros pacientes puedan hacer uso de ellas, esto se convierte en una importante fuente de exposición. Además, dado que el ^{131}I es encontrado en la saliva, las enfermeras deben tener demasiada precaución en el tratamiento con vomito, tos, flemas y estornudos de los pacientes.

La modalidad de egreso individual brindaría una mayor comodidad al paciente, reduciría los costos del hospital y mantendría los altos niveles de seguridad radiológica para los miembros de la comunidad bien se trate de POE o de público en general.

En este trabajo la dosis recibida por cada familiar permitió determinar que tanto el transporte a la vivienda desde el hospital y la vulnerabilidad /discapacidad del paciente son los factores que predominan en para que se produzca un aumento de la exposición del familiar cuidador.

En la sala de hospitalización cada paciente puede recibir hasta 2.18 mSv a causa de sus compañeros de cuarto, dependiendo de la actividad de tratamiento que les fue administrada a cada uno.

Este estudio ha demostrado que las restricciones que son usadas en el INCan para el egreso de los pacientes, basadas sólo en la actividad retenida, podrían ser modificadas, recomendando a la CNSNS considerar la modalidad de egreso individual para pacientes tratados con radiofármacos.

Referencias

- [AM 05] Amdur R., Mazzaferri E., Essentials of Thyroid Cancer Management. Ed. Springer, 2005.
- [AT 86] Attix F.H., Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [ATA 09] The American Thyroid Association (ATA) Guidelines Taskforce on Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer, Revised American Thyroid Association Management Guidelines for Patients with Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer, Cooper D. S., Doherty G. M., Haugen B. R., Kloos R. T., Lee S. L., Mandel S. J., Mazzaferri E. L., McIver B., Pacini F., Schlumberger M., Sherman S. I., Steward D. L. and Tuttle R. M., *Thyroid*, **19**, 11, 1168-1214, 2009
- [BA 08] Barrington S. F., Anderson P., Kettle A.G. Gadd R., Thomson W.H., Batchelor S., Mountford P.J., Harding, L.K., O'Doherty M.J. Measurement of the internal dose to families of outpatients treated with ^{131}I for hyperthyroidism. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, **35**, 11, 2097-2104, 2008
- [BA 10] Barrett K., Barman S., Botano S., Brooks H., Ganong, Fisiología médica. 23ª edición. Ed. Mc Graw Hill, 2010
- [BA 96a] Barrington S. F., Kettle A.G., O'Doherty M.J., Wells C. P., Somer E.J. R. and Coakley A. J. Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of thyroid. *Eur. J. Nucl. Med.*, **23**, 2, 123-130, 1996
- [BA 96b] Barrington, S.F., Kettle, A.G., Thompson, W.H., *et al.* RCP guidelines on radiation protection following radioiodine therapy for hyperthyroidism: are they appropriate? *Nucl. Med. Commun.* **17**, 275, 1996
- [BA 99] Barrington S. F., O'Doherty M.J., Kettle A.G., Thomson W.H., Mountford P.J., Burrell D.N., Farrell R.J., Batchelor S., Seed P., Harding, L.K., Radiation exposure of the families of outpatients treated with radioiodine (iodine-131) for hyperthyroidism. *Eur. J. Nucl. Med.* **26**, 7, 686-692, 1999

- [BU 05] Buenfil A. E. Reporte de Calibración de las Fuentes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, UNAM, México, 2005
- [CA 04] Caron N.R., Clark O.H. Well Differentiated Thyroid Cancer, Scandinavian Journal of Surgery **93**, 261-271, 2004
- [CA 86b] Cameron J.R., Suntharalingam N. and Kenney G.N., Thermoluminescent Dosimetry, University of Wisconsin Press, 1968
- [CO 00] Coover LR, Silberstein EB, Kuhn PJ, et al. Therapeutic ^{131}I in outpatients: a simplified method conforming to the Code of Federal Regulations, title 10, part 35.75. J. Nucl. Med. **41**, 1868–1875, 2000
- [DR 01] Driver, I., Packer, S. Radioactive waste discharge quantities for patients undergoing radioactive iodine therapy for thyroid carcinoma. Nucl. Med. Commun. **22**, 1129–1132, 2001
- [DV 10] Dvorkin M.A., Cardinali D.P, Best & Taylor, Bases Fisiológicas de la práctica médica. 14ª edición. Ed. Panamericana, 2010
- [GA 96] Gamboa-de Buen I., Tesis de Doctorado. Medida de la respuesta Termoluminiscente (Eficiencia y Supralinealidad) de LiF:Mg,Ti Expuesto a Radiación Altamente Ionizante, UNAM. México, 1996
- [GL 96] Glass G.V: and Hopkins K.D., Statistical Methods in Education and Psychology, Allyn and Bacon Eds, 1996
- [GO 09] Gomez N. Temas selectos en cirugía, capítulo X: Glándula tiroides, libros virtuales, 2009. Consultado el 20 de mayo del 2011. Disponible en URL <http://www.intramed.net/sitios/librovirtual8.com>
- [GR 09] Granados M., Herrera A., Manual de Oncología INCan. Ed. Mac Graw Hill. 4ª Edición, México, 2009
- [GU 01] Guyton A. C. y Hall J.E, Tratado de fisiología médica, Décima edición. Ed. Mc Graw-Hill. 2001
- [HE 10] Herrera González José Alfredo. La protección radiológica en el tratamiento con ^{131}I del cáncer diferenciado de tiroides: Recomendaciones en la implementación de un tratamiento que no requiera la hospitalización del paciente. Tesis. Maestría en Ciencias (Física Médica) Posgrado UNAM, México, 2010

- [HI 02] Hilditch T.E., Dempsey M.F., Bolster A.A., McMenemin R.M., Reed N.S. Self-stunning in thyroid ablation: evidence from comparative studies of diagnostic ¹³¹I and ¹²³I. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, **29**, 6, 783-788, 2002
- [HO 04] Hodgson NC, Button J, Solorzano CC. Thyroid cancer: is the incidence still increasing? *Ann Surg Oncol*. **11**, 12, 1093–1097, 2004
- [HO 84] Horowitz, Y.S. Thermoluminescence and thermoluminescent Dosimetry, Vol. I ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1984
- [HO 92] Ho S.Y., Shearer D.R., Radioactive contamination in hospitals from nuclear medicine patients. *Health Phys.* **62**, 5, 462-466, 1992
- [IAEA 09] International Atomic Energy Agency. Nuclear Medicine in Thyroid Cancer Management: A Practical Approach. Viena, 2009
- [IAEA 10] IAEA Position statement on release of patients after radionuclide therapy. IAEA document reference K9010241, 2010-02-23.
- [IAEA 96] International Atomic Energy Agency. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radioactive sources. IAEA Safety Series, No.115. Vienna: IAEA, 1996
- [IB 92] Ibis, E., Wilson, C.R., Collier, B.D., et al. Iodine-131 contamination from thyroid cancer patients. *J. Nucl. Med.* **33**, 2110–2115, 1992
- [ICN 11] Interactive Chart of Nuclides. Disponible en URL: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>. Consultado por última vez en 2011
- [ICRP 04] International Commission on Radiation Protection. Publication No. 94: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Annals of the ICRP Volume 37/2-4*, 2004
- [ICRP 07] International Commission on Radiation Protection. Publication No. 103: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Annals of the ICRP Volume 37/2-4*, 2007
- [ICRP 77] International Commission on Radiation Protection. Publication No. 26: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Annals of the ICRP*, 1977
- [ICRP 88] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals, ICRP Publication No. 53, 1987

- [ICRP 90] International Commission on Radiation Protection. Publication No. 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP Volume **20**/1, 1990
- [ICRU 93] Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. ICRU Publications: Bethesda. 1993.
- [IT 08] Iturbe Hermann Fernando, Protección Radiológica: Curso para personal ocupacionalmente expuesto, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, 2008
- [JA 78] Jacobson A.P., Plato, A. and Toeroek D. Contamination of the home environment by patients treated with iodine-131:initial results. Am. J. Public. Health., **68**, 3, 225-230, 1978
- [LU 08] Luster M, Clarke SE, Dietlein M, Lind P, et al. Guidelines for radioiodine therapy of differentiated thyroid cancer. Eur J Nucl Med Mol Imaging. **35**, 10, 1941-1959, 2008
- [MA 93] Mayles W.P.M, Heisig S. and Mayles H.M.O. Treatment verification and in vivo Dosimetry, In: Williams J.R. and Thwaites D.I., Editors. Radiotherapy Physics in Practice. Oxford: Oxford University Press, Chapter 11, p 226, 1993
- [MA 99a] Mathieu I., Caussin J., Smeesters P., *et al.* Recommended restrictions after ¹³¹I therapy: measured doses in family members. Health Phys. **76**, 129–136, 1999
- [MA 99b] Mazzaferri E.L. An overview of the management of papillary and follicular thyroid carcinoma, 1999
- [MC 85] McKeever S.W.S., Thermoluminescence of solids and related phenomena. Cambridge university press. London, 1985
- [MO 98] Monsieurs M., Thierens H., Dierckx R.A., Casier K., De Baere E., De Ridder L., De Saedeleer C., De Winter H., Lippens M., Van Imschoot S., Wulfranck D., Simons M. Real life radiation burden to relatives of patients treated with iodine-131: a study in eight centres in Flanders (Belgium), Eur. J. Nucl. Med. **25**, 1368-1376, 1998
- [NCRP 07] National Council on Radiation Protection and Measurements. Report No. 155. Management of Radionuclide Therapy Patient, 2007
- [NE 01] Netter, F.H. Atlas de anatomía humana. 2da. Edición. Ed. Masson S.A. New Jersey, 2001

- [NOM 09] Norma Oficial Mexicana NOM-013-NUCL-2009. Requerimientos de seguridad radiológica para egresar a pacientes a quienes se les ha administrado material radiactivo. CNSNS. 1995. Disponible en URL:http://www.cnsns.gob.mx/acerca_de/marco/normas_oficiales.aspx.
- [O'D 93] O'Doherty MJ, Kettle AG, Eustance CNP, Mountford PJ, Coakley AJ. Radiation dose rates from adult patient receiving ^{131}I therapy for thyrotoxicosis. Nucl. Med. Commun., **14**, 160-168, 1993
- [OL 08] de Oliveira J.P., dos Santos Lópes M. M., Ribeiro da Rosa L.A., Barbosa da Fonseca L.M., Corbo R. Dosimetric analysis of persons accompanying nuclear medicine patients in the therapeutic room. Radiol Bras., **41**, 1, 35–38, 2008
- [OR 11] Orlo H., Clark M.D., Thyroid Cancer and Lymph Node Metastases, Journal of Surgical Oncology, **103**, 615–618, 2011
- [PA 06a] Pant G.S., Sharma S.K., Bal C.S., Kumar R. and Rath G.K., Radiation dose to family members of hyperthyroidism and thyroid cancer patients treated with ^{131}I . Radiat. Prot. Dosim., **118**, 1, 22-27, 2006
- [PA 06b] Papadimitriou D., Kottou S., Oros L., *et al.* Differentiated thyroid cancer: comparison of therapeutic iodine ^{131}I biological elimination after discontinuation of levothyroxine versus administration of recombinant human thyrotropin. Annals of Nuclear Medicine, **20**, 1, 63–67, 2006.
- [PA 92] Parkin D.M., Muir C.S., Whelan S.L., Gao Y.T., Ferlay J., Powell J. Cancer incidence in five continents. Vol. 6. Lyon, France: International Agency for Research on cancer (IARC), 1992
- [RE 11] Reynoso Mejia Carlos Alberto, Comparación entre dosis medida y calculada para una fuente de ^{192}Ir . Tesis. Maestría en Ciencias (Física Médica) Posgrado UNAM, México, 2011
- [RO 08] Rodríguez-Laguna Alejandro, Diseño de un protocolo para la vigilancia de incorporaciones de material radiactivo en el personal ocupacionalmente expuesto de un departamento de medicina nuclear. Tesis. Maestría en Ciencias (Física Médica) Posgrado UNAM, México, 2008
- [RO 09] Rosenthal S. The Thyroid Sourcebook. Quinta edición. Ed. Mc Graw Hill, 2009
- [RU 10] Ruiz M.A., Ferrer N., Córdoba D., Alonso L., Sastre J.M. y Arranz L. Dosimetría de pacientes con cáncer diferenciado de tiroides en tratamiento de terapia metabólica con ^{131}I a partir de medidas de tasa de dosis externa. Rev. Fís. Med. **11**, 1, 35-42, 2010

- [SC 98] Schlumberger M. J., Papillary and follicular thyroid carcinoma. *N. Engl. J. Med.* 338, 297–306, 1998
- [SI 08] Silverthorn, D.E. *Fisiología humana: un enfoque integrado*. Cuarta edición. Madrid: Panamericana, 2008
- [SPSS 11] *Statistical Package for the Social Sciences 20*, IBM, 2011
- [TH 08] Thibodeau G., Patton K. *Estructura y función del cuerpo humano*. 12ª edición. Ed. Elseiver, 2008
- [USNRG 97] United States Nuclear Regulatory Commission. *Regulatory Guide 8.39: Release of Patients Administered Radioactive Materials*. 1997
- [WA 06] Wartofsky L., Nostrand D., *Thyroid Cancer: A Comprehensive Guide to Clinical Management*. Second edition. Ed. Humana Press. 2006
- [YA 02] Yang, J. S., Kim, D. Y., Chang, S. Y., Nam, Y. M. and Park, J. W. Thermoluminescence characteristics of Teflon embedded CaSO₄:Dy TLD. *Radiat. Prot. Dosim.* **100**, 337–339, 2002
- [ZO 00] Zoetelief J., Julius H.W. and Christensen P. Recommendations for patient dosimetry in diagnostic radiology using TLD. In *Nuclear Science and Technology*. European Commission, 2000

Apéndice A. Esquema de decaimiento y propiedades del ^{131}I

El ^{131}I tiene una vida media de 8.02 d y es un emisor de radiación beta y gamma, su esquema de decaimiento se muestra en la Figura AC.1. La Tabla AA.1 muestra las principales energías de emisión y sus abundancias. Otra cantidad importante es la constante gamma $\Gamma = 0.0528$ mSv x m²/mCi x d.

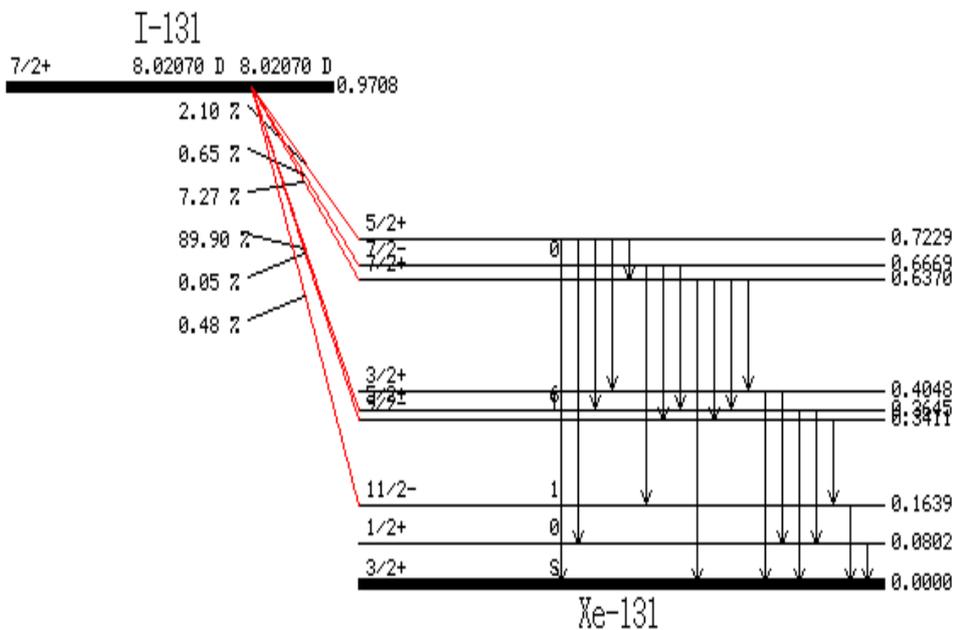


Figura AA.6. Esquema de decaimiento. Tomado de [ICN 11].

Tabla AA.25. Energía y abundancia de las principales emisiones de ^{131}I

Emisión	Energía (keV)	Abundancia (%)
Beta	606	89.3
	334	7.4
Gamma	364	81.2
	637	7.3
	284	6.2

Apéndice B. Instrucciones de protección radiológica al paciente tras la administración de una terapia con ¹³¹I.

- No comer por una hora después de la administración del radioyodo. Si vomita dentro de las 4 horas seguidas al tratamiento, hacerlo en un cubo de basura e informar inmediatamente al departamento de medicina nuclear.
- Evitar el transporte público si es posible, de lo contrario el viaje en transporte público debe ser restringido a alrededor de 2h. No tomar un largo viaje (5h o más) en compañía del familiar a cargo de su cuidado. Además intente estar lo más alejado posible, de las personas que se encuentran en su mismo viaje.
- Duerma en cuarto separado, de no ser posible procurar dormir en camas separadas
- Terminar todos los alimentos que inicia a comer y no compartir comida ni bebidas con otras personas.
- Todos los platos y utensilios que requiera para su comida, deben ser usados solo por usted.
- Evitar besos, en especial a niños y además relaciones sexuales.
- Bañarse diariamente si es posible 2 o 3 veces al día, debiendo enjuagar la regadera cada vez que la usa.
- Lavar su ropa y tendidos de cama separada de la de los demás miembros de su casa.
- Si es posible, hacer uso exclusivo de un cuarto de baño. En donde: los hombres deben orinar sentados, el papel higiénico usado para secar los genitales debe ser arrojado al inodoro, donde debe ser evacuado tras dos o tres descargas por uso del inodoro. Esta última recomendación es de suma importancia, para el caso en que el cuarto de baño deba ser compartido.

Cada vez que el baño sea usado debe lavarse las manos y secada usando una toalla independiente.

- En caso de que tenga contacto con niños, bebés y/o mujeres embarazadas es mejor que alguien cuide de ellos. De no ser posible evitar en la mayor medida posible su cercanía con ellos.
- Para las mujeres que estén dando de amamantar, debe parar antes de la terapia con radioyodo.
- Aquellos eventos en los que se presente cercanía con otros individuos durante varias horas deben ser evitados.
- Si en su trabajo no presenta cercanía con otras personas puede retornar al tercer día después de aplicado el tratamiento, de lo contrario solo lo puede hacer hasta una semana después. En caso de que trabaje con una o más personas, una semana es suficiente, pero si en su trabajo prepara comida para otros o trabaja con niños o mujeres en embarazo, es necesario tomar de 2 a 3 semanas, de acuerdo con la actividad suministrada durante el tratamiento.
- En caso de sufrir algún accidente o emergencia médica, el familiar al cuidado debe informar el tipo, actividad y fechas de la terapia con radionúclido que usted recibió.
- En caso de sospecha de embarazo al momento de recibir la terapia, debe informar al médico inmediatamente.

Apéndice C. Encuesta realizada a los familiares de los pacientes tratados con ¹³¹I

Nombre: _____ Edad: _____
Estado Civil: _____ Sexo: _____
Actividad Suministrada: _____ Teléfono: _____
Lugar de residencia: _____

Lea con atención las siguientes preguntas y conteste con letra clara. Señale con una x la respuesta que le parezca más adecuada cuando se trate de opción múltiple.

1. Contándose, cuantas personas habitan en su casa? _____ personas
2. Escriba, de manera aproximada el tiempo que cada una de las personas referidas previamente, permanece durante el día en la casa:

Familiar	Tiempo de permanencia
1. _____	_____
2. _____	_____
3. _____	_____

3. ¿El paciente presenta cercanía con niños en su lugar de residencia ?

No () Si () ¿Cuantos? _____

4. Si su respuesta anterior, fue Si, indique las edades de cada uno de los niños en la siguiente línea

Edades _____

5. ¿El paciente presenta cercanía con adultos (aparte de usted) en su lugar de residencia?

No () Si () ¿Cuantos? _____

6. ¿Cuántas habitaciones tiene la casa en la que habita, sin considerar baños, cocina ni pasillos? _____ habitaciones
7. ¿Con cuantas personas, el familiar comparte su dormitorio? _____ personas
8. ¿Cuántos baños tiene su casa? _____ baños
9. ¿Con cuantas personas el familiar comparte el baño que utiliza? _____ personas
10. ¿Cuanto tiempo le toma transportarse hasta su lugar de residencia?
11. Realice un bosquejo de su vivienda, en la que especifique la ubicación del dormitorio y baño que usara el paciente.

12. Indique el ultimo nivel de estudios que haya cursado:

- | | |
|-----------------------------|------------------|
| Primaria () | Licenciatura () |
| Secundaria () | Maestría () |
| Preparatoria () | Doctorado () |
| Otro () Especifique: _____ | |

13. ¿Cual es la forma de transporte que utiliza para ir de su casa al hospital y viceversa, en compañía del paciente?

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| Metro () | Vehículo privado () |
| Autobuses públicos () | Vehículo Publico (Taxi) () |
| Caminando () | Otro () Especifique: _____ |

14. ¿Presenta algún tipo de discapacidad?

- No () Si ()

Especifique de qué tipo:

- Visual () Auditiva () Motora () Otra () Especifique: _____

15. El paciente requiere ayuda para realizar alguna de sus actividades diarias?

NO () Si ()

Especifique que cuidado requiere y quien se hará cargo de éste:

16. El paciente presenta alguna discapacidad

No () Si ()

Especifique de qué tipo:

Visual () Auditiva () Motora () Otra () Especifique: _____

Apéndice D. Caracterización de los Dosímetros Termoluminiscentes

Para la caracterización del lote de 91 dosímetros CaSo:Dy (TLD-900) utilizado durante el desarrollo de este trabajo, cada dosímetro se irradió 3 veces con una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ durante dos minutos con cinco segundos.

En la segunda columna de la Tabla AD.1 se muestra el promedio de las 3 respuestas TL obtenidas junto con su desviación estándar ($R_{\text{TL,prom}}$), para cada dosímetro (D). En la siguiente columna, se enlistan los factores de corrección, (C_{ij}), calculados con la ecuación 4.2 y finalmente en esta tabla, se encuentra el promedio de los valores de las señales TL modificadas por su correspondiente factor de corrección, seguidos de su respectiva incertidumbre ($R_{\text{TL,corr}}$). El total de la Tabla AD.1. son 8 columnas, donde las últimas 4 muestran la misma distribución de las anteriores para los dosímetros restantes.

Tabla AD.26. Respuestas TL de los TLD-900, luego de ser expuestos a una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ durante dos minutos con cinco segundos, antes y después de ser aplicado el factor de corrección.

D.	$R_{\text{TL,prom}} (\mu\text{C})$	Cij	$R_{\text{TL,corr}} (\mu\text{C})$	D.	$R_{\text{TL,prom}} (\mu\text{C})$	Cij	$R_{\text{TL,corr}} (\mu\text{C})$
1	5.17 ± 0.07	1.05	5.42 ± 0.07	47	5.20 ± 0.30	0.84	5.20 ± 0.30
2	4.80 ± 0.50	1.15	5.50 ± 0.50	48	5.36 ± 0.05	0.90	5.42 ± 0.05
3	4.63 ± 0.06	1.17	5.42 ± 0.07	49	5.30 ± 0.10	0.97	4.90 ± 0.10
4	5.03 ± 0.04	1.08	5.42 ± 0.04	50	5.58 ± 0.04	1.15	4.92 ± 0.03
5	4.60 ± 0.50	1.20	5.50 ± 0.60	51	5.58 ± 0.04	1.01	5.46 ± 0.05
6	5.40 ± 0.10	1.00	5.40 ± 0.10	52	5.07 ± 0.05	0.89	5.40 ± 0.40
7	4.90 ± 0.40	1.11	5.50 ± 0.40	53	4.91 ± 0.40	0.82	5.50 ± 0.50
8	4.56 ± 0.50	1.20	5.50 ± 0.50	54	4.75 ± 0.50	0.93	5.40 ± 0.10
9	4.76 ± 0.06	1.14	5.42 ± 0.06	55	5.90 ± 0.10	1.14	5.43 ± 0.20
10	5.07 ± 0.05	1.07	5.42 ± 0.05	56	5.60 ± 0.20	1.12	5.40 ± 0.40
11	5.62 ± 0.05	0.96	5.42 ± 0.05	57	5.20 ± 0.40	0.93	5.40 ± 0.10
12	6.17 ± 0.04	0.88	5.42 ± 0.03	58	4.30 ± 0.10	0.85	5.50 ± 0.50
13	5.58 ± 0.04	0.97	5.42 ± 0.04	59	5.00 ± 0.50	0.92	5.40 ± 0.10
14	4.59 ± 0.03	1.18	5.42 ± 0.04	60	5.60 ± 0.20	0.98	5.42 ± 0.08
15	4.90 ± 0.10	1.10	5.40 ± 0.10	61	6.08 ± 0.08	0.98	5.40 ± 0.10
16	6.10 ± 0.20	0.89	5.40 ± 0.10	62	5.40 ± 0.10	0.96	5.50 ± 0.50
17	4.90 ± 0.20	1.09	5.40 ± 0.20	63	4.40 ± 0.40	0.98	5.42 ± 0.05
18	4.40 ± 0.40	1.23	5.50 ± 0.50	64	4.45 ± 0.04	1.18	5.40 ± 0.10
19	4.70 ± 0.20	1.14	5.40 ± 0.20	65	5.40 ± 0.10	1.25	5.50 ± 0.50
20	4.60 ± 0.50	1.18	5.50 ± 0.60	66	5.90 ± 0.60	1.28	5.40 ± 0.10
21	6.00 ± 0.10	0.89	5.40 ± 0.10	67	5.40 ± 0.10	1.40	5.50 ± 0.60
22	5.10 ± 0.60	1.08	5.50 ± 0.60	68	5.20 ± 0.60	1.01	5.42 ± 0.08
23	5.39 ± 0.07	1.01	5.42 ± 0.07	69	5.07 ± 0.08	1.16	5.40 ± 0.30
24	5.52 ± 0.05	0.98	5.42 ± 0.05	70	5.10 ± 0.30	1.01	5.42 ± 0.05
25	4.60 ± 0.50	1.20	5.50 ± 0.60	71	5.07 ± 0.04	1.41	5.42 ± 0.05
26	5.70 ± 0.10	0.95	5.40 ± 0.10	72	4.23 ± 0.04	1.13	5.42 ± 0.08
27	5.33 ± 0.13	1.02	5.40 ± 0.10	73	3.99 ± 0.05	1.23	5.42 ± 0.07
28	5.03 ± 0.04	1.08	5.42 ± 0.04	74	3.89 ± 0.05	1.30	5.42 ± 0.16
29	4.83 ± 0.07	1.12	5.42 ± 0.08	75	3.57 ± 0.11	0.92	5.40 ± 0.10
30	5.01 ± 0.06	1.08	5.42 ± 0.06	76	4.96 ± 0.10	0.97	5.40 ± 0.30
31	5.17 ± 0.07	1.05	5.42 ± 0.07	77	4.30 ± 0.30	0.89	5.40 ± 0.10
32	4.30 ± 0.50	1.27	5.50 ± 0.70	78	4.90 ± 0.09	0.84	5.40 ± 0.10
33	4.50 ± 0.50	1.22	5.50 ± 0.60	79	3.50 ± 0.09	0.99	5.50 ± 0.60
34	5.90 ± 0.50	0.92	5.42 ± 0.05	80	4.50 ± 0.50	0.99	5.42 ± 0.09
35	4.50 ± 0.50	1.22	5.50 ± 0.60	81	4.05 ± 0.07	0.90	5.40 ± 0.30
36	4.82 ± 0.07	1.12	5.42 ± 0.08	82	3.80 ± 0.20	0.97	5.50 ± 0.50
37	4.34 ± 0.03	1.24	5.42 ± 0.04	83	5.50 ± 0.50	0.99	5.40 ± 0.10
38	5.39 ± 0.03	1.01	5.42 ± 0.04	84	5.12 ± 0.10	0.84	5.42 ± 0.01
39	4.63 ± 0.03	1.17	5.42 ± 0.04	85	5.59 ± 0.07	0.89	5.42 ± 0.09
40	5.65 ± 0.09	0.96	5.42 ± 0.08	86	5.97 ± 0.09	0.97	5.42 ± 0.06
41	4.02 ± 0.05	1.35	5.42 ± 0.06	87	5.03 ± 0.05	1.15	5.40 ± 0.10
42	4.59 ± 0.07	1.18	5.42 ± 0.08	88	5.06 ± 0.10	1.01	5.40 ± 0.10
43	4.64 ± 0.01	1.17	5.42 ± 0.02	89	5.54 ± 0.10	0.89	5.42 ± 0.09
44	5.03 ± 0.04	0.99	5.00 ± 0.04	90	5.14 ± 0.09	0.82	5.50 ± 0.60
45	4.80 ± 0.50	0.98	4.60 ± 0.50	91	5.10 ± 0.60	0.93	5.20 ± 0.30
46	5.10 ± 0.40	0.93	5.42 ± 0.07				