



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

RESPUESTA RELATIVA DE TLD-100 IRRADIADO CON ELECTRONES DE
ALTA ENERGÍA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (FÍSICA MÉDICA)

PRESENTA:
GISSELLE GALLO GUERRERO

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MARÍA ISABEL GAMBOA DE BUEN
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DRA. OLGA LETICIA ÁVILA AGUIRRE
POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

DRA. MERCEDES RODRÍGUEZ VILLAFUERTE
INSTITUTO DE FÍSICA

M. en C. JOSÉ GERARDO GUTIÉRREZ CASTILLO
POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2015



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.

A mis padres y hermanos.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi segunda casa y darme la oportunidad de aprender todo lo que he querido.

Al Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI por dejarme utilizar sus instalaciones y equipos que permitieron la realización de este trabajo.

Al Instituto de Ciencias Nucleares por permitirme utilizar las instalaciones para realizar parte de los experimentos de este trabajo así como brindarme un espacio de estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme un apoyo económico durante los dos años en los que cursé mis estudios de posgrado.

Al proyecto PAPIIT-UNAM IN111912 por el apoyo económico otorgado para la realización de la tesis.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Isabel Gamboa de Buen por ser una excelente tutora y una gran persona.

Al M.en C. José Gerardo Gutiérrez Castillo por su orientación y apoyo durante los experimentos realizados en el HO-CMNSXXI. Al M. en C. Óscar Ángeles Zaragoza por sus valiosos consejos.

A los miembros de mi comité tutor: Dra. María Isabel Gamboa de Buen, Dra. Olga Leticia Ávila Aguirre, M.en C. José Gerardo Gutiérrez Castillo y la Dra. Mercedes Rodríguez Villafuerte por el interés mostrado durante la realización de este trabajo.

A los miembros de mi comité sinodal: Dra. María Isabel Gamboa de Buen, Dr. Miguel Ángel Ávila Rodríguez, Dr. Héctor Alva Sánchez, M. en C. Evangelina Figueroa Medina y Dr. Jorge Rickards Campbell por su comentarios que enriquecieron este trabajo.

A mis amigos de la maestría: Charly, JJ, Javi, Alan e Iván, que me hicieron más amena la estancia en el posgrado.

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	2
1.2	Marco teórico.....	6
1.2.1	Clasificación de la radiación	6
1.2.2	Magnitudes dosimétricas	6
1.2.3	Interacción de los electrones con la materia	7
1.2.4	Cálculo de la dosis impartida por electrones	13
1.2.5	Fenómeno termoluminiscente	14
2	Desarrollo experimental.....	17
2.1	Irradiación en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI.....	18
2.1.1	Respuesta termoluminiscente	23
2.1.2	Análisis de las curvas de brillo con GlowFit.....	24
3	Cálculos teóricos	31
3.1	Cálculo analítico	31
3.2	Cálculo Monte Carlo.....	35
3.2.1	Simulación con PENELOPE	36
4	Resultados y discusión.....	39
4.1	Curvas de brillo	39
4.2	Linealidad	40
4.3	Respuesta relativa.....	48
5	Conclusiones	53
6	Bibliografía.....	55

RESUMEN

El uso de haces de electrones es común durante la práctica clínica en los servicios de radioterapia para lo cual es necesario conocer con precisión la dosis impartida. Para ello se pueden utilizar dosímetros termoluminiscentes, que permiten realizar dosimetría *in vivo* en pacientes durante procedimientos de rutina o para monitorear la dosis en casos especiales, así como la verificación de las técnicas de tratamiento en maniquíes.

Se determinaron la respuesta como función de la dosis y la respuesta relativa del área bajo la curva de brillo y de los picos que la componen, así como su factor de supralinealidad, en función de la dosis para dosímetros de LiF:Mg,Ti (TLD-100) irradiado con electrones de 6, 9, 12, 15 y 18 MeV. Las irradiaciones se realizaron en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI, a dosis en agua entre 0.1 y 5 Gy.

Además, se llevaron a cabo un cálculo analítico y una simulación Monte Carlo para obtener teóricamente los valores de la respuesta relativa y compararlos con los experimentales.

Se obtuvo que la respuesta termoluminiscente para el área bajo la curva de brillo y los picos 4, 5 6a y 9 varía en forma lineal para las dosis hasta 1 Gy y es supralineal a dosis mayores que 1 Gy. Para los picos 6b, 7, 8 el comportamiento es supralineal en todo el intervalo de dosis utilizado

La respuesta relativa (RR) del área bajo la curva de brillo de TLD-100 medida es estadísticamente igual para las energías nominales de 6, 12, 15 y 18 MeV, en tanto que las RR de los picos 5 y 6a son independientes de la energía del haz de electrones, dentro de un nivel de confianza del 0.05.

Los valores de la respuesta relativa obtenidos con el cálculo analítico y la simulación Monte Carlo concuerdan con los resultados experimentales con una diferencia porcentual menor o igual que 4.5%, para las energías nominales de electrones de 6, 12, 15 y 18 MeV, para 9 MeV la diferencia es de 6.5 %.

ABSTRACT

In clinical practice the electron beams are common in radiotherapy services being necessary to determinate the absorbed dose accurately which can be obtained using thermoluminescent dosimeters, for in vivo dosimetry in patients during routine procedures or to monitoring the dose in special cases, as well as verification of treatment techniques on phantoms.

The response as a function of dose and the relative response of the area under the glow curve and its deconvoluted peaks, as well as its supralinearity factor of dosimeters LiF:Mg,Ti (TLD-100) were determined for 6, 9, 12, 15 and 18 MeV electron beams. The irradiations were performed at the Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI, at doses in water between 0.1 and 5 Gy.

In addition, an analytical calculation and a Monte Carlo simulation were carried out to obtain theoretically the values of the relative response.

We obtained that thermoluminescent response of the area under the glow curve and peaks 4, 5, 6a and 9 varies linearly up to 1 Gy dose and supralinearly at higher doses than 1 Gy. Peaks 6b, 7, 8 were supralinear on dose range used.

Relative response (RR) of the area under the glow curve of TLD-100 is statistically equal for 6, 12, 15 and 18 MeV, while RRs for peaks 5 and 6a are independent of electron beam energy, within a confidence interval of 0.05.

Values of the relative response obtained with the analytical calculus and Monte Carlo simulation were consistent with experimental results with a lower or equal 4.5% difference, for 6, 12, 15 and 18 MeV nominal electron energies, for 9 MeV the difference is 6.5%

1 INTRODUCCIÓN

El uso de haces de electrones es común durante la práctica clínica en los servicios de radioterapia, donde se utilizan para tratar tumores superficiales con una profundidad menor que 5 cm (E. Podgorsak 2005) y en irradiaciones de cuerpo completo para tratar enfermedades superficiales de la piel, como la micosis fungoide, así como para el tratamiento de cánceres en el cuero cabelludo como el linfoma cutáneo, el carcinoma de células escamosas y el angiosarcoma, donde es necesario irradiar al paciente con una dosis razonablemente homogénea sin comprometer el cerebro y el cráneo. En el tratamiento de carcinoma en el vestíbulo nasal y en los cánceres de los ganglios del cuello cervical posterior se aplica un tratamiento de refuerzo con electrones y para la irradiación total de alguno de los miembros de cuerpo afectados por melanoma, linfoma o sarcoma de Kaposi (Gerbi, y otros 2009). También se pueden utilizar para tratar lesiones superficiales del ojo y los párpados eficazmente (Gerbi, y otros 2009). La irradiación se realiza con aceleradores lineales (LINAC, por sus siglas en inglés) con energías nominales de electrones en el rango de 6 a 20 MeV (Hogstrom y Almond 2006).

El uso terapéutico de los haces de electrones implica conocer con precisión las magnitudes dosimétricas involucradas. Para ello se pueden utilizar dosímetros termoluminiscentes, que permiten realizar dosimetría *in vivo* en pacientes durante procedimientos de rutina o para monitorear la dosis en casos especiales, dosimetría personal en servicios médicos donde se utiliza radiación ionizante y auditorías dosimétricas como las realizadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), así como la verificación de las técnicas de tratamiento en diferentes maniquíes, y la comparación de magnitudes dosimétricas entre hospitales (E. Podgorsak 2005).

Los dosímetros termoluminiscentes utilizados con mayor frecuencia en aplicaciones médicas son LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P y Li₂B₄O₇:Mn, por ser tejido equivalentes o CaSO₄:Dy, Al₂O₃:C y CaF₂:Mn por ser altamente sensibles (E. Podgorsak 2005). En este trabajo se utilizó LiF:Mg,Ti que se puede encontrar comercialmente como TLD-100 en forma de pequeñas tabletas y tiene la concentración natural de ⁶Li y ⁷Li.

Los objetivos de esta tesis fueron obtener la respuesta termoluminiscente como función de la dosis de TLD-100 irradiado con haces de electrones de 6, 9, 12, 15 y 18 MeV para posteriormente determinar la respuesta relativa como función de la energía. Se realizó también la deconvolución de las curvas de brillo para encontrar la respuesta relativa de cada uno de los picos en función de la energía de los haces de electrones utilizados. Las irradiaciones de los dosímetros se realizaron en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI y reproduciendo las condiciones experimentales se hicieron simulaciones Monte Carlo para obtener la respuesta relativa en función de la energía.

1.1 Antecedentes

Los TLD son calibrados para obtener la dosis en agua en un haz de fotones de referencia, generalmente rayos gamma de ^{60}Co , por lo que es necesario un factor de corrección por energía para tomar en cuenta la diferencia entre la respuesta del TLD en el haz de electrones con una calidad X y su respuesta al haz de referencia, con el fin de obtener una dosis absorbida, debido al haz de electrones, de manera precisa (Mosia y Chamberlain 2007) .

Una forma de cuantificar esta diferencia es a través de la respuesta relativa, que definen Mobit y colaboradores para cualquier medio, (Mobit, Nahum y Mayles 1996) como:

$$RR = \frac{\left(\frac{RTL}{D_{med}}\right)_E}{\left(\frac{RTL}{D_{med}}\right)_{^{60}\text{Co}}} \quad (1.1)$$

donde $\left(\frac{RTL}{D_{med}}\right)_E$ es la respuesta termoluminiscente por unidad de dosis en un medio para el haz de interés con calidad E y $\left(\frac{RTL}{D_{med}}\right)_{^{60}\text{Co}}$ es la respuesta termoluminiscente por unidad de dosis en el mismo medio irradiado con rayos gamma de ^{60}Co . Para haces de electrones el medio de referencia es agua y la respuesta relativa se determina en la región de respuesta lineal.

En varios artículos, como el de Marre y colaboradores (Marre, y otros 2000), el de Mobit, Nahum y Mayles (Mobit, Nahum y Mayles 1996), entre otros, lo que se reporta no es la respuesta relativa que se muestra en la ecuación (1.1) si no su inverso multiplicativo al que le llaman factor de corrección por energía, f_{Co}^E . Para comparar esos resultados con los de este trabajo se hicieron las conversiones correspondientes.

En la figura 1.1 se muestran las respuestas relativas medidas para el área bajo la curva de brillo por diferentes autores en función de la energía de los haces de electrones a la entrada de los dosímetros de LiF:Mg.Ti.

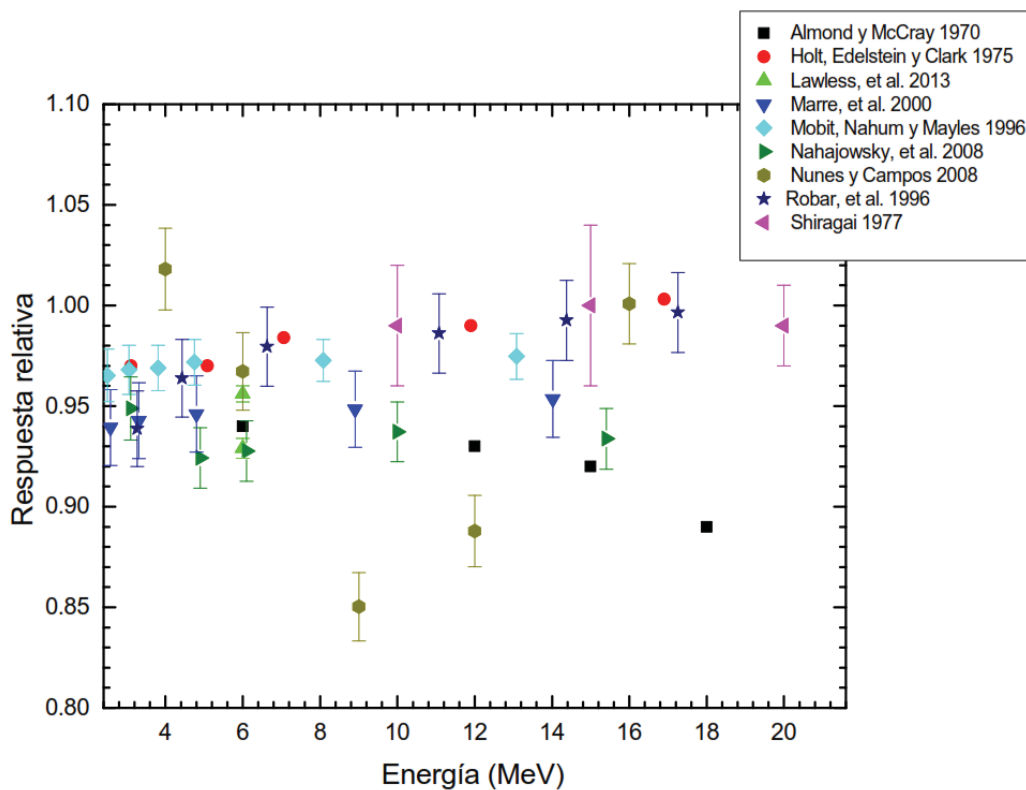


Figura 1.1. Respuesta relativa en función de la energía de los electrones utilizados durante la irradiación de los dosímetros termoluminiscentes.

En la tabla 1.1 se exponen las condiciones bajo las cuales cada uno de los autores llevó a cabo la irradiación de sus dosímetros termoluminiscentes; en todos los casos se utilizó LiF:Mg.Ti.

Tabla 1.1 Irradiaciones de dosímetros termoluminiscentes (LiF:Mg.Ti) con electrones de alta energía realizadas por diferentes autores.

Autores	Tipo de dosímetro utilizado	Condiciones de irradiación	Energía nominal (MeV)
Almond y McCray 1970	TLD-700 en polvo	Profundidad de 1.5 cm en un maniquí de poliestireno. Dosis de 100 rad en agua	6, 9, 12, 15, 18, 35
Mobit, Nahum y Moyles 1996	TLD-100 tabletas	Maniquí de PMMA Profundidad de $d_{m\acute{a}x}$ para cada haz	4, 6, 8, 10, 15, 20
Holt, Edelstein y Clark 1975	TLD-700 cilindros	Profundidad de 1.5 cm en un maniquí de poliestireno. Dosis de 100 rad en agua	3, 6, 8, 10, 15, 20
Marre, et al. 2000	LiF en polvo DTL 937	Profundidad de referencia en agua	6, 9, 12, 16, 20
Nahajowski, et al 2008	Tabletas de LiF (MTS-N)	Profundidad de $d_{m\acute{a}x}$ en agua para cada haz	6, 9, 12, 16, 20
Lawless, et al. 2013	TLD-100 tabletas	Irradiación a la profundidad de referencia en agua	6
Nunes y Campos	TLD-100 tabletas	Profundidad de $d_{m\acute{a}x}$ en un maniquí de agua sólida	4, 6, 9, 12, 16
Robar, et al. 1996	TLD-100 tabletas	Maniquí de poliestireno a la profundidad de $d_{m\acute{a}x}$	6, 9, 12, 15, 18, 22

Almond y McCray (Almond y McCray 1970) reportaron que los dosímetros utilizados no presentaban dependencia con la energía y que su respuesta termoluminiscente por dosis absorbida era constante en todo el rango de energías estudiadas. En su artículo Shiragai (Shiragai 1997) no encontró diferencia entre la respuesta termoluminiscente (TL) para rayos gamma de ^{60}Co y haces de electrones por debajo de 35 MeV, en tanto que los resultados de Holt y colaboradores (Holt, Edelstein y Clark 1975) mostraron una disminución de la respuesta relativa cuando se disminuyó la energía del haz de electrones.

Marre y colaboradores (Marre, y otros 2000) establecieron que el factor de corrección por energía para los haces de electrones utilizados varía no sólo con la energía, sino también con el tamaño del dosímetro y la naturaleza del medio que lo rodea, la variación fue de a lo más un 4.3% bajo las condiciones en la que se realizaron las mediciones.

Nahajowski y colaboradores (Nahajowski, y otros 2008) determinaron para dosímetros termoluminiscentes LiF:Mg,Ti (MTS-N) un factor de corrección por energía promedio de $1.07 \% \pm 1.1\%$ para todas las energías de electrones utilizadas.

Por otro lado Nunes y Campos (Nunes y Campos 2008) obtuvieron la respuesta termoluminiscente de TLD-100 y CaSO₄:Dy, encontrando que las respuestas relativas de los dosímetros de CaSO₄:Dy varían hasta un 15.63% y que las de TLD-100 hasta un 25.67% con la energía de los electrones.

Mosia y Chamberlain (Mosia y Chamberlain 2007) realizaron simulaciones Monte Carlo para calcular la dosis absorbida en los dosímetros termoluminiscentes de LiF irradiados con haces de electrones de entre 5 y 20 MeV y encontraron que la respuesta de los dosímetros es independiente de la energía para las energías utilizadas.

Robar y colaboradores (Robar, y otros 1996) obtuvieron que a energías mayores que 10 MeV la respuesta termoluminiscente de los dosímetros por unidad de dosis es igual a la de rayos gamma de ⁶⁰Co, en tanto que por debajo de esta energía la respuesta relativa disminuye con la energía.

Debido a que hay discrepancia entre los valores de la respuesta relativa medida para dosímetros termoluminiscentes de LiF irradiados con haces de electrones de alta energía, se decidió realizar el presente trabajo.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Clasificación de la radiación

La radiación es energía en movimiento que al interactuar con la materia puede ionizarla o no hacerlo, si lo hace se le nombra radiación ionizante y si no, se le llama no ionizante. La radiación ionizante, que es la que interesa a este trabajo, se clasifica en directamente ionizante e indirectamente ionizante.

La radiación directamente ionizante corresponde a las partículas cargadas, como los electrones o los iones pesados, que depositan su energía en el medio a través de múltiples interacciones coulombianas cuando atraviesan la materia.

La radiación indirectamente ionizante corresponde a partículas sin carga, como los fotones y los neutrones, que interactúan con la materia en un proceso de dos pasos en el que primero transfieren energía a partículas cargadas y después éstas depositan su energía en el medio a través de interacciones coulombianas.

1.2.2 Magnitudes dosimétricas

1.2.2.1 Kerma

El kerma (K) es el valor esperado de la energía que se transfiere a partículas cargadas, por radiación indirectamente ionizante, por unidad de masa en el punto de medición y se puede escribir como (Attix 1986):

$$K = \frac{d\epsilon_{tr}}{dm} \quad (1.2)$$

donde ϵ_{tr} es la energía transferida. La unidad en que se mide el kerma es el $Gy = 1 \frac{J}{kg}$.

1.2.2.2 Dosis

La dosis está definida como el valor esperado de la energía depositada en la materia por unidad de masa en el punto de interés y se escribe como:

$$D = \frac{d\epsilon}{dm} \quad (1.3)$$

donde ϵ es la energía impartida. La unidad en que se mide la dosis es el Gy.

1.2.3 Interacción de los electrones con la materia

Los electrones son partículas cargadas con una masa de 9.11×10^{-31} kg, que pueden interactuar electrostáticamente con los electrones o los núcleos de la materia que atraviesan. En muchas de las interacciones se transfieren fracciones pequeñas de la energía cinética de los electrones por lo que es conveniente utilizar la aproximación de frenado continuo, CSDA por su siglas en inglés, en la que se supone que el electrón transfiere su energía a la materia de manera continua en un proceso sin fricción (Attix 1986).

Para caracterizar la interacción coulombiana de los electrones con el medio, se utilizan el parámetro de impacto b y el radio atómico a , ver figura 1.2. Si $b \gg a$ se dice que la colisión es “suave”, el electrón interactúa con el átomo como un todo y le transfiere muy poca energía; la probabilidad de que ocurra uno de estos eventos es grande y por eso aproximadamente la mitad de la energía que lleva el electrón se pierde en este tipo de interacción. Si $b \sim a$ la colisión es “dura” y el electrón puede interactuar con los electrones internos del átomo de manera que éstos son emitidos con suficiente energía cinética como para ionizar y se llaman rayos delta (δ). En el caso de que $b \ll a$, el electrón interactúa con el núcleo del átomo y en la mayoría de los casos es dispersado elásticamente, lo que produce el camino tortuoso que tienen los electrones en medios con número atómico (Z) alto; en pocas ocasiones (2-3%) el electrón interactúa inelásticamente con el núcleo y se emite un fotón de rayos X, a este tipo de radiación se le llama de frenado. En la figura 1.2 se muestran los diferentes tipos de colisiones.

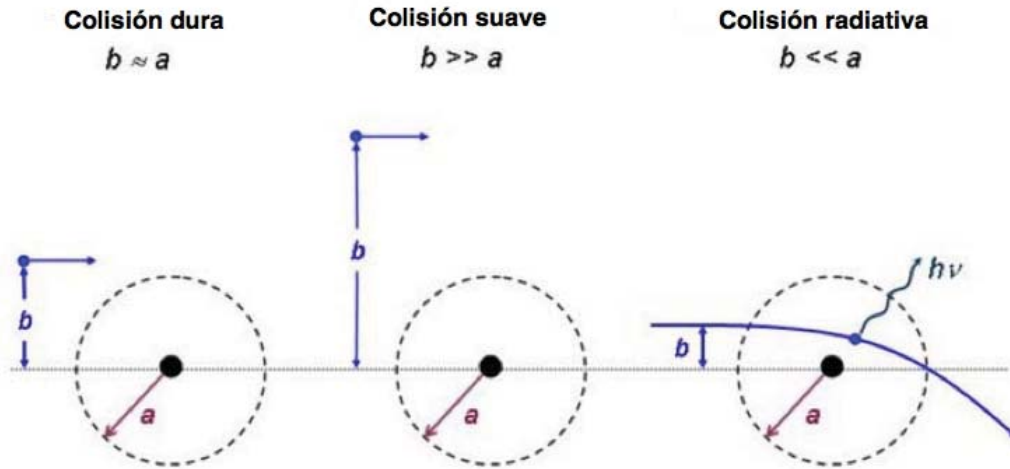


Figura 1.2 Parámetros de impacto a y b donde se muestran las diferentes interacciones de los electrones con la materia. Imagen tomada del libro Radiation physics for medical physicist (E. B. Podgorsak 2006).

1.2.3.1 Poder de frenado

Para cuantificar la rapidez de la energía que pierde el electrón por unidad de longitud de trayectoria se define el poder de frenado como: $\left(\frac{dT}{dx}\right)_{Z,E}$ el cual depende de la energía de la partícula y del número atómico del medio o bien, el poder de frenado másico como: $\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{Z,E}$, donde ρ es la densidad del medio.

Las unidades son $\frac{MeV}{cm}$ y $\frac{MeVcm^2}{g}$, respectivamente.

El poder de frenado se clasifica en poder de frenado de colisiones y radiativo, el primero está relacionado con las interacciones duras y suaves del electrón con el átomo y el segundo con las interacciones radiativas. Se escribe el poder de frenado de colisiones de la siguiente forma:

$$S_c = \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c = \left(\frac{dT_s}{\rho dx}\right)_c + \left(\frac{dT_h}{\rho dx}\right)_c \quad (1.4)$$

El término $\left(\frac{dT_s}{\rho dx}\right)_c$ corresponde a las colisiones suaves y $\left(\frac{dT_h}{\rho dx}\right)_c$ a las colisiones duras.

Para el caso de electrones el poder másico de frenado de colisiones (E. B. Podgorsak 2006) es:

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c = 2\pi r_e^2 \frac{Z}{A} N_A \frac{m_e c^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{T}{I} + \ln \left(1 + \frac{\tau}{2}\right) + F^-(\tau) - \delta \right] \quad (1.5)$$

$$F^-(\tau) = (1 - \beta^2) \left[1 + \frac{\tau^2}{8} - (2\tau + 1) \ln 2 \right] \quad (1.6)$$

Donde

r_e es el radio clásico del electrón

Z es el número atómico del material

A es el número de masa del material

N_A es el número de avogadro

m_e es la masa en reposo del electrón

c es la velocidad de la luz

τ es la energía del electrón normalizada a $m_e c^2$, es decir $\tau = \frac{T}{m_e c^2}$

β es la velocidad del electrón normalizada a c , es decir $\beta = \frac{v}{c}$

δ es la corrección por efecto de polarización

T es la energía cinética del electrón

I es el potencial de ionización y excitación promedio

Por otro lado el poder másico de frenado radiativo de los electrones está dado por (Attix 1986):

$$S_r = \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_r = \sigma_0 \frac{N_A Z^2}{A} (T + m_e c^2) \overline{B}_r \quad (1.7)$$

donde $\sigma_0 = \frac{1}{137} \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2$, T es la energía cinética del electrón y \overline{B}_r es una función que depende de la energía T y tiene los siguientes valores:

$$\bar{B}_r = \begin{cases} \frac{16}{3} & \text{para } T \ll 0.5 \text{ MeV} \\ 6 & \text{para } T = 1 \text{ MeV} \\ 12 & \text{para } T = 10 \text{ MeV} \\ 15 & \text{para } T = 100 \text{ MeV} \end{cases} \quad (1.8)$$

En la figura 1.3 se graficaron los poderes másicos de frenado de colisiones y radiativo para electrones en agua líquida y LiF como función de la energía para el intervalo utilizado durante este trabajo, los valores se tomaron del libro Introduction to radiological physics and radiation dosimetry (Attix 1986).

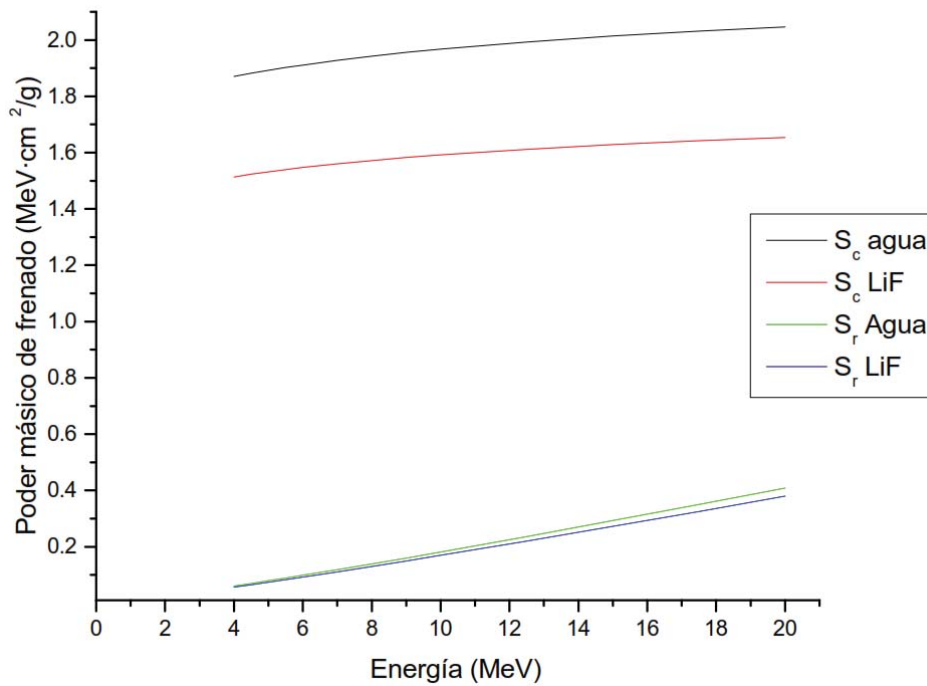


Figura 1.3 Poderes másicos de frenado de colisiones y radiativo para electrones en agua y LiF.

El poder de frenado másico total se expresa como la suma de los poderes másicos de frenado de colisiones y radiativo. En la figura 1.4 se graficaron los poderes másicos de frenado total para agua y LiF, los valores fueron tomados del libro Introduction to radiological physics and radiation dosimetry (Attix 1986).

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right) = \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c + \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_r \quad (1.9)$$

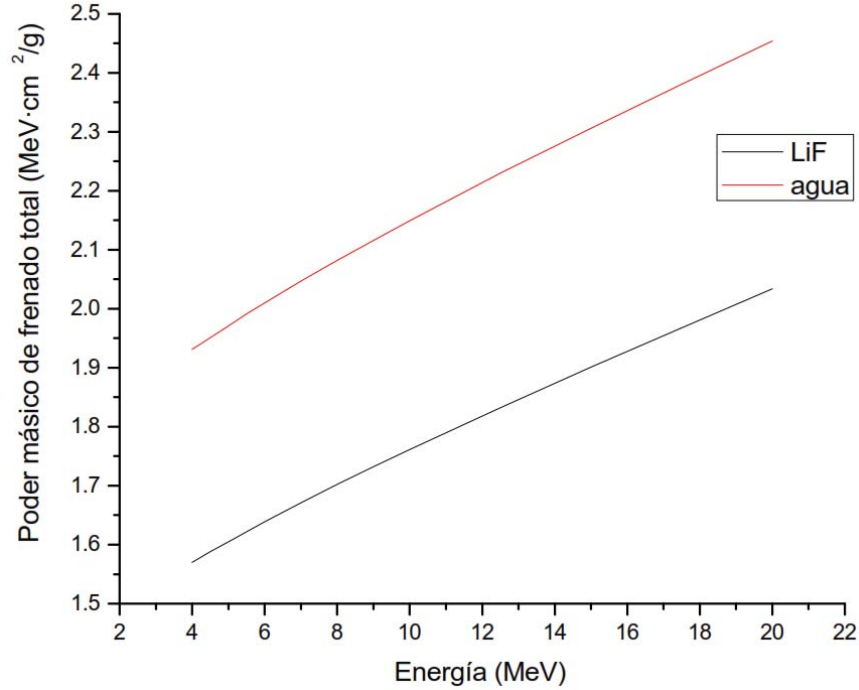


Figura 1.4 Poderes másicos de frenado total para agua y LiF.

1.2.3.2 Producción de radiación

La producción de radiación $Y(T_0)$ de un electrón con energía inicial T_0 se define como la fracción de la energía inicial que es emitida como radiación de frenado cuando el electrón se frena y llega al reposo. La cantidad de energía radiada por el electrón es $Y(T_0) \cdot T_0$ y el rendimiento de radiación tiene la siguiente ecuación (Attix 1986) :

$$Y(T_0) = \frac{\int_0^{T_0} \frac{(dT/\rho dx)_r}{(dT/\rho dx)} dT}{\int_0^{T_0} dT} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{(dT/\rho dx)_r}{(dT/\rho dx)} dT \quad (1.10)$$

En la figura 1.5 se muestra el rendimiento de radiación para electrones en agua y LiF en el intervalo de energías utilizado durante este trabajo, los valores se

obtuvieron del libro Introduction to radiological physics and radiation dosimetry (Attix 1986).

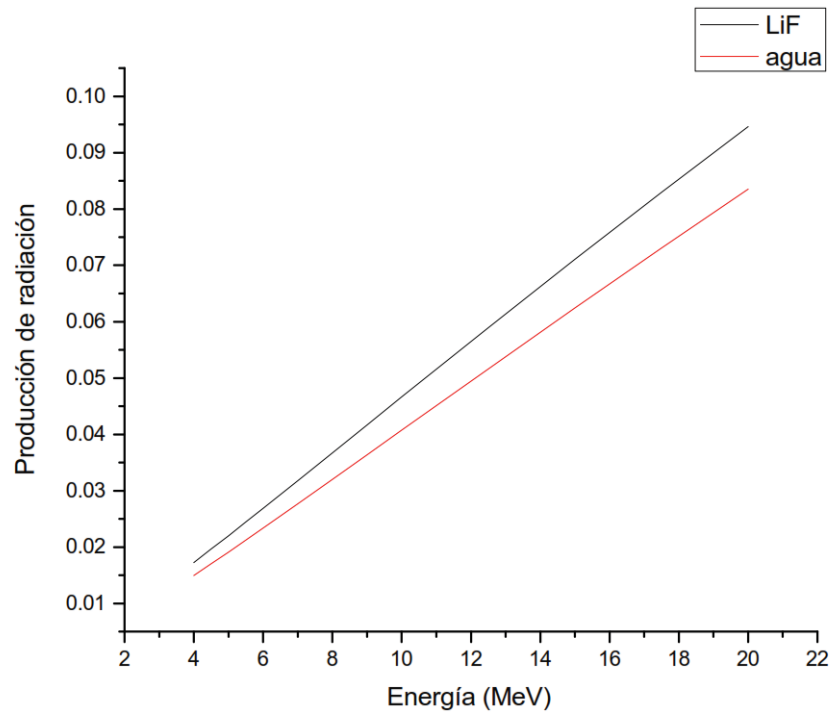


Figura 1.5 Rendimiento de radiación para electrones en agua y LiF.

1.2.3.3 Alcance de partículas cargadas

Cuando un electrón atraviesa la materia pierde su energía por las colisiones que sufre y la radiación de frenado que emite, lo que tiene como resultado desviaciones de su camino inicial y le confiere una trayectoria tortuosa dentro del material que atraviesa ver figura 1.6.

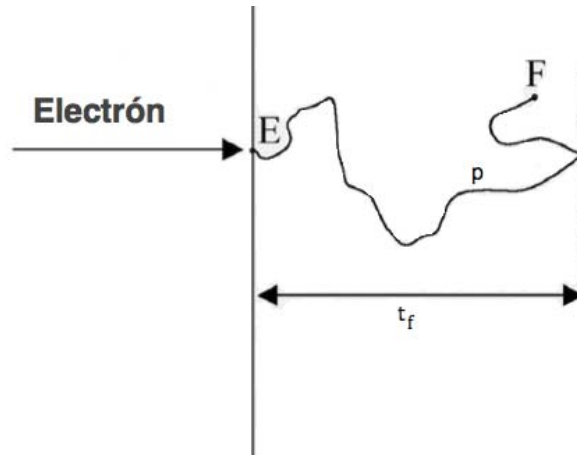


Figura 1.6 Alcance de un electrón que atraviesa un material y máxima profundidad.

Se define el alcance (R) de una partícula cargada como el valor esperado de la longitud de trayectoria, p , que sigue ésta hasta el reposo, ver figura 1.6. El alcance proyectado, $\langle t \rangle$, de un electrón es el valor esperado que expresa la máxima profundidad, t_f , que puede atravesar la partícula en el material absorbente, en tanto que el alcance en aproximación de frenado continuo, R_{CSDA} , se expresa en función del inverso del poder de frenado másico como (Attix 1986):

$$R_{CSDA} = \int_0^{T_0} \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)^{-1} dT \quad (1.11)$$

donde T_0 es la energía inicial de la partícula, el R_{CSDA} , el alcance y $\langle t \rangle$ tienen unidades de $\frac{g}{cm^2}$.

1.2.4 Cálculo de la dosis impartida por electrones

Para el caso en el que los electrones inciden perpendicularmente en una lámina gruesa, se utilizan la aproximación CSDA y el rendimiento de radiación para calcular el alcance y la energía que gasta el electrón en producir rayos X, respectivamente; de manera que la energía que pierde el electrón en interacciones de colisión al atravesar un medio de espesor d es:

$$\Delta T_c = (T_0 - T_f)_c = \{T_0[1 - Y(T_0)] - T_f[1 - Y(T_f)]\}_c \quad (1.12)$$

donde T_0 es la energía inicial del electrón en MeV, T_f es la energía con la que sale el electrón en MeV, llamada energía residual, y $Y(T_0)$ y $Y(T_f)$ son los rendimientos de radiación para las respectivas energías.

Finalmente, para calcular la dosis promedio depositada en el blanco de grosor másico ρd se usa la siguiente expresión:

$$\bar{D} = 1.6 \times 10^{-10} \frac{\phi \Delta T_c}{\rho d} \quad [Gy] \quad (1.13)$$

donde ϕ es la fluencia de electrones $\left(\frac{\text{electrones}}{\text{cm}^2}\right)$, ρ es la densidad del medio y ρd tiene unidades de g/cm^2 .

1.2.5 Fenómeno termoluminiscente

La luminiscencia es un fenómeno físico en el cual algunos materiales emiten luz. En función del método de excitación que estimula la emisión se nombran los diferentes procesos luminiscentes. En el caso de que sea la radiación ionizante la que produce la luminiscencia se puede hablar de dos procesos: fluorescencia y fosforescencia: si el tiempo en el que ocurre la emisión de luz es menor que 10^{-8} s a partir de la absorción se habla de la primera y, si es mayor que 10^{-8} s, de la segunda (Furetta y Weng, Operational Thermoluminescence Dosimetry 1998).

Otra diferencia entre la fosforescencia y la fluorescencia es que la primera es dependiente de la temperatura y permanece a pesar de que se haya removido la fuente de excitación. Si el proceso se puede observar bajo condiciones de aumento de temperatura constante a la fosforescencia se le llama termoluminiscencia.

El proceso termoluminiscente ocurre en dos etapas. En la primera, se irradia el material, en equilibrio, lo que provoca una acumulación de energía debida al campo de radiación induciendo de ese modo un estado metaestable en el material. La segunda etapa involucra el regreso al equilibrio a través de la estimulación térmica, con la emisión de la luminiscencia dependiente de la cantidad de energía absorbida durante la irradiación (McKeever, Moscovitch y Townsend 1995).

En la termoluminiscencia, a partir de un evento de ionización se lleva a un electrón de la banda de valencia a la de conducción, donde migra a una trampa de electrones, por ejemplo un lugar en la red cristalina en donde falta un ión negativo. El agujero migra hacia una trampa de agujeros. A la temperatura que existe durante la irradiación, por ejemplo temperatura ambiente, estas trampas deben ser lo suficientemente profundas (en energía potencial) como para que los electrones o agujeros no se escapen durante periodos de tiempo largos, a menos que un calentamiento deliberado los libere. Cuando el material es calentado se libera el electrón, que regresa a la banda de conducción y migra a una trampa para agujeros, la cual se puede suponer que actúa como un centro luminiscente emitiéndose un fotón de luz (Attix 1986).

A la intensidad de la luz emitida en función de la temperatura, se le llama curva de brillo, un ejemplo se muestra en la figura 1.7. La curva se puede obtener de la teoría de Randall-Willkins en un modelo de cinética de primer orden (Furetta y Weng, Operational Thermoluminescence Dosimetry 1998).

La intensidad de uno de los picos de la curva de brillo está dada por la ecuación (Puchalska y Bilski 2005):

$$I(T) = I_m \exp\left(\frac{E}{kT_m} - \frac{E}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E}{kT_m^2} \int_{T_m}^T \exp\left(\frac{E}{kT_m} - \frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (1.14)$$

donde I es la intensidad del pico, E la energía de activación, k la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta, e I_m y T_m la intensidad y la temperatura del máximo, respectivamente. La energía de activación es la energía necesaria

para liberar a los portadores de carga y también se le llama profundidad de la trampa.

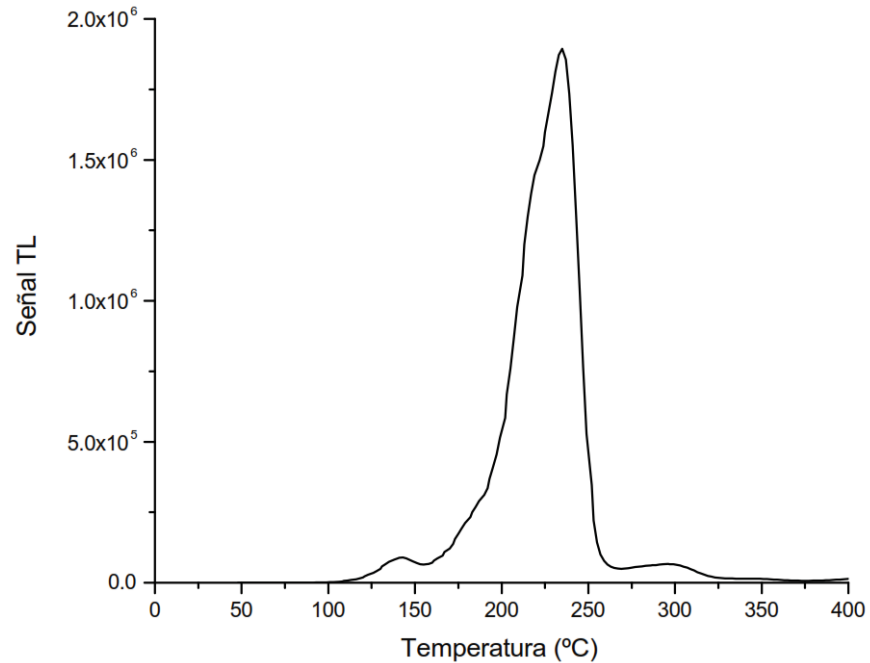


Figura 1.7 Curva de brillo de TLD-100 irradiado con electrones de 6 MeV.

Los materiales que generalmente se utilizan para realizar medidas dosimétricas son sólidos dieléctricos como por ejemplo el LiF:Mg,Ti que es ampliamente utilizado debido a que su número atómico efectivo es tejido equivalente, 8.2 para LiF:Mg,Ti y 7.4 para tejido (Masillon-JL, Gamboa-deBuen y Brandan 2006).

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los dosímetros termoluminiscentes utilizados fueron tabletas de LiF:Mg,Ti (TLD-100, Harshaw/ThermoFisher Scientific) de $3.2 \times 3.2 \times 0.89 \text{ mm}^3$ con una densidad de 2.635 g/cm^3 .

Antes de realizar la irradiación en el acelerador lineal, los dosímetros termoluminiscentes (TLD-100) se hornearon durante una hora a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ seguido de dos horas a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, aplicando en ambos casos un enfriamiento rápido a temperatura ambiente. El horneado se realizó en el Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) de la UNAM en una mufla Thermoline modelo F47915.

Los TLD-100 se irradiaron con electrones, en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI (HO-CMNS XXI), utilizando energías nominales de 6, 9, 12, 15 y 18 MeV, a las dosis en agua de 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4 y 5 Gy. La irradiación se realizó en un maniquí de "Agua Sólida" Blue Water Phantom de la marca Standard Imaging a la profundidad de referencia para cada energía. Las placas de agua sólida utilizadas median $30 \times 30 \text{ cm}^2$ de área por 0.5 o 0.2 cm de espesor. A una de las placas de 0.2 cm se le realizaron cinco perforaciones, de 1 mm de profundidad, en el centro, para colocar los dosímetros durante la irradiación. En todos los casos se colocó suficiente material retrodispersor en forma de placas de 1 cm de espesor de agua sólida.

También se irradiaron los dosímetros con rayos gamma de ^{60}Co en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) a valores de kerma en aire entre 0.05 y 0.5 Gy que corresponden a dosis en agua entre 0.055 y 0.55 Gy. La irradiación con gammas se realizó en aire, bajo condiciones de equilibrio de partícula cargada, colocando los TLD-100 en el centro de un portadosímetros de acrílico de $3 \times 3 \times 1.2 \text{ cm}^3$.

La lectura de los dosímetros se realizó en un equipo Harshaw 3500 del ICN de la UNAM a una rapidez de calentamiento de $8 \text{ }^\circ\text{C/s}$, calentando desde temperatura ambiente hasta $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Las lecturas se realizaron bajo una

atmósfera de N_2 , que se inyectaba en la región en donde se colocaba el TLD-100.

2.1 Irradiación en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI

El acelerador lineal que se utilizó para realizar las irradiaciones fue un Clinac iX de la marca Varian, ver figura 2.1



Figura 2.1 Acelerador lineal Clinac iX de la sala Terapia 3 del Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI.

Antes de la irradiación de los dosímetros se realizó la calibración de los haces de electrones de acuerdo al formalismo del protocolo TG-51 de la Asociación Americana de Físicos en Medicina, AAPM por sus siglas en inglés. (Almond, y otros 1999) que se basa en un factor de calibración para la cámara de ionización, $N_{D,w}$, en términos de dosis absorbida en agua en un haz de calidad de referencia. En este protocolo se utiliza una profundidad de referencia, Z_{ref} , y, para simplificar, las calidades de los haces y todos los factores dependientes de éstas se expresan en términos de la profundidad de hemiabsorción, R_{50} , en lugar de la energía del haz. La relación entre la energía del haz y la profundidad de hemiabsorción está dada por (International Atomic Energy Agency IAEA 2001).

$$E_o = 2.33 R_{50} \quad (2.1)$$

Donde E_o es la energía promedio del haz en MeV, en la superficie del maniquí y R_{50} se expresa en g/cm^2 .

La profundidad de hemiabsorción, R_{50} , es la profundidad en agua en la que la dosis absorbida es el 50% del valor de la dosis absorbida máxima, medida a una distancia fuente-superficie de 100 cm. Para energías menores o iguales que $E_o = 16 MeV$ se utiliza un tamaño de campo de $10 \times 10 cm^2$ y para energías mayores que $E_o = 16 MeV$ uno de $20 \times 20 cm^2$, en este último caso de acuerdo al TRS-398 (International Atomic Energy Agency IAEA 2001) se puede usar un campo menor siempre y cuando el R_{50} no cambie en más de $0.1 g/cm^2$ respecto al valor medido para el campo de $20 \times 20 cm^2$.

Por otro lado, la profundidad de referencia, Z_{ref} , en g/cm^2 según el TRS-398 (International Atomic Energy Agency IAEA 2001) está dada por la expresión:

$$Z_{ref} = 0.6R_{50} - 0.1 \quad (2.2)$$

Finalmente, para determinar la dosis absorbida en agua, a la profundidad de referencia en agua sólida, Z_{ref} , para un haz de electrones de calidad Q se utilizó la fórmula:

$$D_{ref} = PDD D_{max} = PDD M_Q N_{D,w} k_Q \quad (2.3)$$

Donde PDD es el porcentaje de dosis en profundidad, D_{max} es la dosis a la profundidad de dosis máxima, $N_{D,w} = 53.89 \frac{Gy}{nC}$ corresponde al factor de calibración de la cámara de ionización utilizada y k_Q es el factor específico de la cámara que corrige por las diferencias entre la calidad del haz de referencia y la calidad Q del usuario. El valor de M_Q es la lectura de la cámara de ionización corregida por las magnitudes de influencia como se muestra a continuación:

$$M_Q = M k_{pol} k_{sat} k_{PT} \quad (2.4)$$

donde M es la lectura de la cámara de ionización en nC/UM , UM significa unidad monitor y corresponde a una medida de la salida del acelerador lineal, realizada con una cámara de ionización monitor instalada en el cabezal del acelerador, k_{pol} es la corrección por polaridad, k_{sat} es la corrección por recombinación y k_{PT} es la corrección por presión y temperatura y se debe a la diferencia entre las condiciones de presión y temperatura para las que se da el valor del factor de calibración (20 °C y 1 atm) y las del lugar donde se realiza la medida por el usuario.

Para determinar la dosis a la profundidad de referencia en agua sólida se obtuvo la lectura de la cámara de ionización plano-paralela modelo PPC05, colocándola en el maniquí de agua sólida a la profundidad de dosis máxima utilizando un cono para electrones de 10 x 10 cm² y un electrómetro de la marca DOSE-1. La irradiación se realizó a una distancia fuente superficie (SSD) de 100 cm y 100 UM para todos los haces de electrones. La lectura se corrigió por las magnitudes de influencia de acuerdo a la ecuación 2.4 y la dosis se calculó con la ecuación 2.3. Finalmente se obtuvo el rendimiento, $\frac{D_{ref}}{UM}$.

A partir de las ecuaciones (2.2) y (2.3) y las R_{50} proporcionadas por el HO-CMNS XXI para los haces de electrones utilizados durante el experimento se calcularon la energía promedio, E_o , y la profundidad de referencia, Z_{ref} , que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores de la profundidad de hemiabsorción, R_{50} , la profundidad de referencia, Z_{ref} , y la energía promedio, E_o , de los haces de electrones, del LINAC utilizado.

$E_{nominal}$ (MeV)	R_{50} (g/cm ²)	Z_{ref} (cm)	E_o (MeV)
6	2.4	1.34	5.6
9	3.63	2.08	8.5
12	5.05	2.93	11.8
15	6.37	3.72	14.8
18	7.64	4.48	17.8

Debido a que la irradiación de los dosímetros se hizo en agua sólida, se utilizó el rendimiento para obtener la dosis absorbida, D_{ref} , en este medio y poder calcular las UM necesarias para impartir las dosis a las que se irradiaron los TLD-100.

Al inicio de cada una de las sesiones de irradiación se utilizó un dispositivo llamado QuickCheck de la marca PTW, ver figura 2.2, para verificar que la dosis sobre el eje, la calidad del haz y la tasa de dosis fueran consistentes para cada una de las energías de electrones utilizadas, los disparos del acelerador lineal se realizaron con 100 UM y un cono de 20 x 20 cm².



Figura 2.2. Dispositivo “Quickcheck”(marca PTW) con el que se realiza la verificación matinal diaria de los haces de radiación, en el acelerador lineal.

Posteriormente, para la irradiación de los dosímetros se colocaron los TLD-100 en las cinco perforaciones realizadas en la placa de “Agua Sólida” Blue Water Phantom a la profundidad de referencia (Z_{ref}) para cada energía y se irradiaron a una SSD de 100 cm a cada una de las dosis mencionadas anteriormente, ver figura 2.3. Durante todas las irradiaciones se utilizó un cono de $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

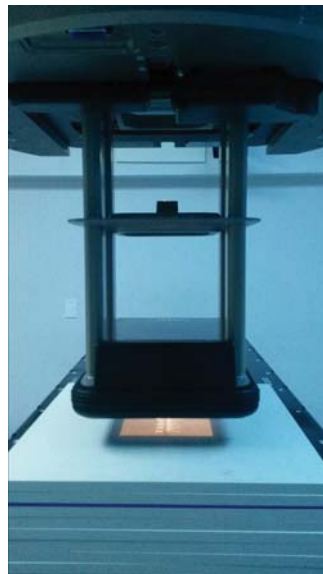


Figura 2.3 Irradiación de los TLD-100 con un haz de electrones a la profundidad de referencia con una SSD de 100 cm y un cono de $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

Una vez irradiados, los TLD-100 se leyeron en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM para determinar la región de linealidad en la respuesta y posteriormente la respuesta relativa por unidad de dosis en agua, RR, que es la respuesta termoluminiscente, RTL, por unidad de dosis en agua, D_{agua} , para electrones de energía T , dividida entre la misma relación obtenida para rayos gamma de ^{60}Co . La ecuación (2.5) es la respuesta relativa presentada en (1.1) cuando el medio es agua.

$$RR = \frac{\left(\frac{RTL}{D_{agua}}\right)_E}{\left(\frac{RTL}{D_{agua}}\right)_{^{60}\text{Co}}} \quad (2.5)$$

2.1.1 Respuesta termoluminiscente

Para determinar la respuesta termoluminiscente (RTL), que es el área bajo la curva de brillo o de cada uno de sus picos componentes, se obtuvo el promedio de la señal termoluminiscente correspondiente, de los cinco dosímetros irradiados a una energía y dosis dadas. Se graficaron los promedios de las respuestas termoluminiscentes como función de la dosis para determinar la zona donde el comportamiento es lineal, y en esta región se calcularon la pendiente y su incertidumbre con el programa Origin 8.0. El valor de la pendiente corresponde a $\left(\frac{RTL}{D_{agua}}\right)_E$ para cada una de las energías de electrones utilizadas.

Para rayos gamma de ^{60}Co se graficó la respuesta termoluminiscente del dosímetro TLD-100 en función del kerma en aire y se realizó un ajuste lineal para obtener la pendiente de la recta que corresponde al cociente $\left(\frac{RTL}{K_{aire}}\right)_{^{60}\text{Co}}$.

Debido a que las irradiaciones con rayos gamma de ^{60}Co se hicieron bajo condiciones de equilibrio de partícula cargada, $K_{aire} = D_{aire}$ y se puede obtener la dosis en agua a partir de la relación

$$D_{agua} = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{agua}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{aire}} D_{aire} \quad (2.6)$$

Entonces:

$$\left(\frac{RTL}{D_{agua}}\right)_{60Co} = \frac{\left(\frac{RTL}{K_{aire}}\right)_{60Co}}{\left(\frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{agua}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{aire}}\right)_{60Co}} \quad (2.7)$$

Para realizar lo anterior se utilizaron los coeficientes másicos de absorción de energía para fotones con energía promedio de 1.25 MeV cuyos valores son los siguientes:

$$\mu_{en}^{aire}/\rho = 0.0267 \frac{cm^2}{g} \text{ y } \mu_{en}^{agua}/\rho = 0.0296 \frac{cm^2}{g} \quad (2.8)$$

Los coeficientes másicos de absorción de energía se obtuvieron del Apéndice D.3 Coeficientes másicos de atenuación, coeficientes másicos de transferencia de energía y coeficientes másicos de absorción de energía para interacciones de fotones en diferentes medios en cm^2/g del libro Introduction to radiological physics and radiation dosimetry (Attix 1986).

Con el cociente anterior, $\left(\frac{RTL}{D_{agua}}\right)_{60Co}$, y los datos experimentales, $\left(\frac{RTL}{D_{agua}}\right)_E$, para cada uno de los haces de electrones se calculó la RR con la ecuación (2.5) y su respectiva incertidumbre.

2.1.2 Análisis de las curvas de brillo con GlowFit

Para realizar el análisis de las curvas de brillo del TLD se hizo la deconvolución de los picos que la forman con GlowFit. Éste es un programa desarrollado por Puchalska y Bilski (Puchalska y Bilski, GlowFit a new tool for thermoluminescence glow-curve deconvolution 2006) basado en MS Windows y escrito en lenguaje C++ que posee una interfaz gráfica, ver figura 2.4

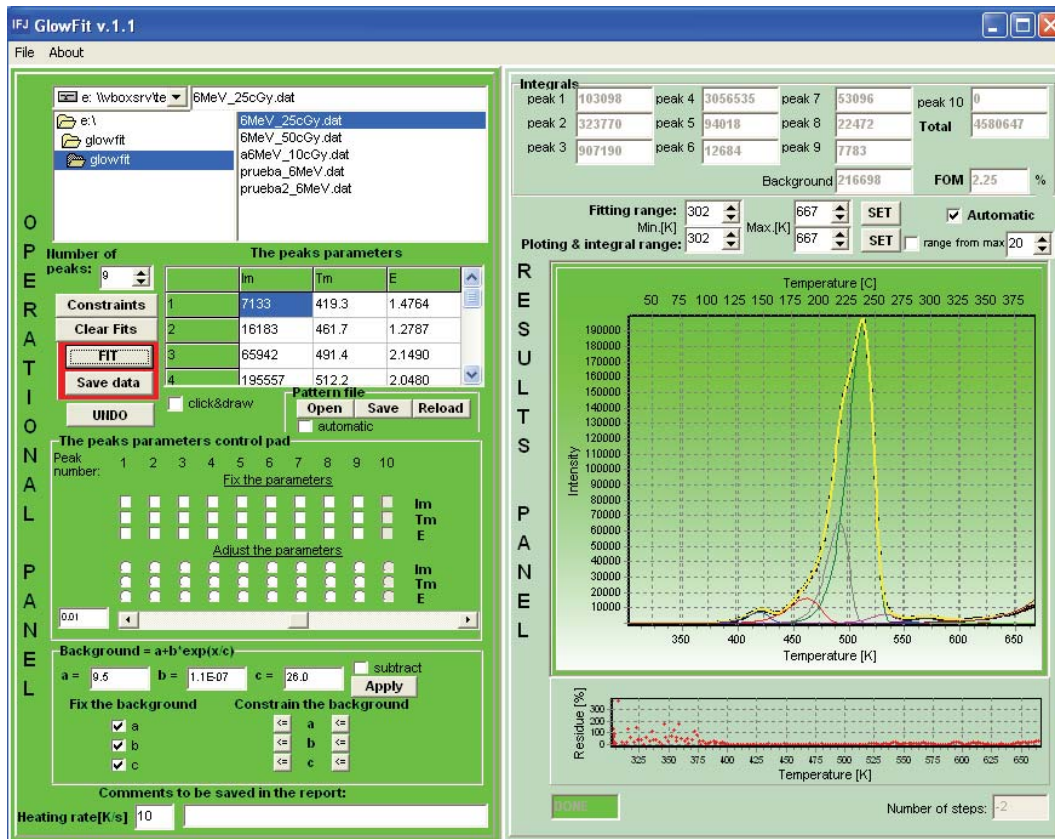


Figura 2.4 Interfaz gráfica del programa GlowFit.

Para iniciar el proceso de deconvolución primero se realizó un archivo de datos que contenía información de la curva de brillo (temperatura (°C) e intensidad termoluminiscente), posteriormente se definió un archivo patrón que incluía la distancia en temperatura entre la posición de cada pico y el máximo global, el cociente de las intensidades de cada pico con respecto a la del máximo global y la energía de activación de cada pico. Se realizó la deconvolución de las curvas de brillo en nueve picos: el 2, 3, 4, 5, 6a, 6b, 7, 8 y 9, siendo el pico 5 el máximo global.

Con GlowFit, una vez se realiza exitosamente la deconvolución, se genera automáticamente un archivo patrón que puede ser utilizado para las siguientes curvas de brillo. Los resultados de la deconvolución se muestran en la pantalla y se almacenan en un archivo de Excel (reporte) que contiene toda la información importante de la curva de brillo: el nombre del archivo analizado y la altura, la energía de activación, la temperatura del máximo y el área de cada uno de los picos ajustados. El programa arroja un parámetro que describe la

calidad del ajuste, la figura de mérito (FOM), en todas las deconvoluciones este valor fue menor que el 5 %.

GlowFit permite el ajuste de los parámetros de temperatura y de la energía de activación para cada uno de los picos, en este caso se dejaron los valores iniciales de energía fijos en todas las deconvoluciones y se permitió que las temperaturas para los picos 2, 3, 4 y 5 fueran ajustadas por el programa.

Después de realizar la deconvolución de las curvas de brillo con GlowFit se utilizó una hoja de cálculo de Excel, para terminar de ajustarla ya que los picos de alta temperatura: 6b, 7, 8 y 9 no coincidían del todo con los resultados experimentales. El ajuste se realizó para cada una de las curvas de brillo de los 5 dosímetros irradiados, para cada una de las 9 dosis utilizadas y cada una de las 5 energías de los haces de electrones utilizados. De esta forma se realizó la deconvolución de 225 curvas de brillo.

La hoja de Excel permitía cambiar la altura de los picos, su temperatura y el fondo de la curva de brillo para ajustarlos correctamente, además de obtener otro tipo de parámetros como la energía de activación y el área bajo cada uno de los picos, así como el área total bajo la curva. Estos últimos datos se utilizaron para el cálculo de la respuesta relativa de cada uno de los picos que componen la curva de brillo. Al igual que GlowFit, la hoja de Excel obtenía una figura de mérito (FOM) con los datos experimentales y calculados para cuantificar la calidad del ajuste.

En la figura 2.5 se muestra parte de la hoja de Excel que se utilizó para ajustar una curva de brillo típica.

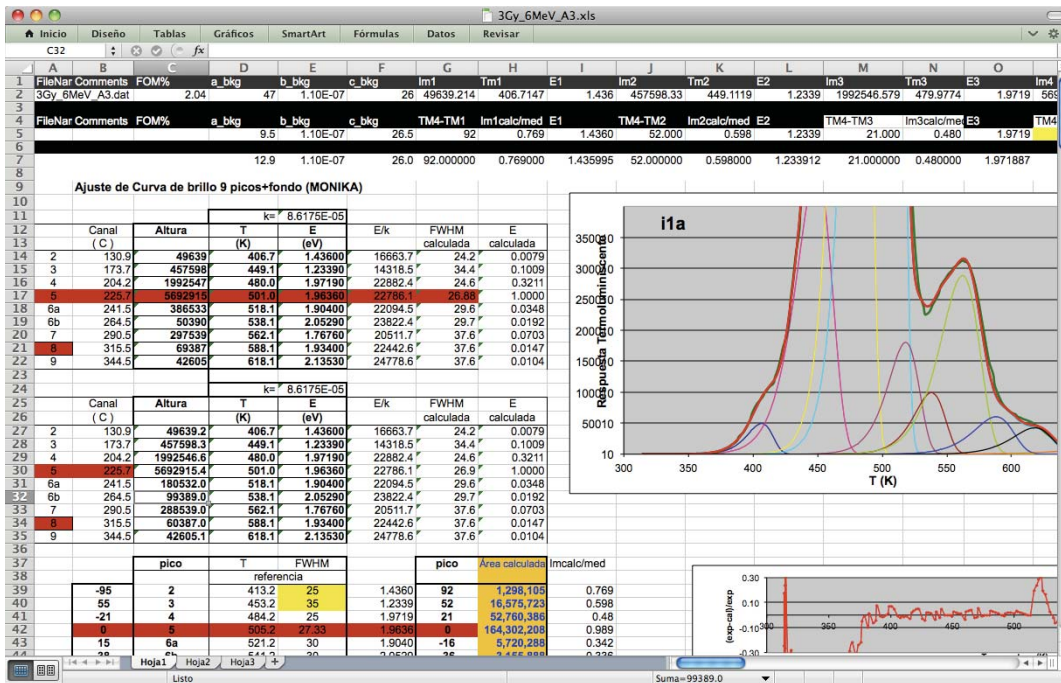


Figura 2.5 Hoja de cálculo de Excel utilizada para ajustar las curvas de brillo obtenidas experimentalmente en HO-CMNS XXI.

En la figura 2.8 se muestra la deconvolución para la curva de brillo de un dosímetro TLD-100 irradiado con electrones de 6 MeV a una dosis de 3 Gy, el FOM del ajuste fue de 2.7%.

La curva de brillo está formada por nueve picos, llamados 2, 3, 5, 6a, 6b, 7, 8 y 9. El de mayor altura es el pico 5 y a partir del pico 6b la altura de los picos es muy pequeña comparada con el máximo, por esa razón en la esquina superior derecha de la figura 2.8 se muestra un ampliación de la parte final de la curva de brillo compuesta por los picos 6b, 7, 8 y 9.

Se observa en la figura 2.6 que el ajuste realizado con GlowFit y la hoja de Excel coincide con los datos experimentales para la curva de brillo del TLD-100 irradiado con electrones de 6 MeV a una dosis de 3 Gy. Como en todas las deconvoluciones la figura de mérito fue menor que el 5 % ya no se colocaron más ejemplos de las otras 225 curvas de brillo.

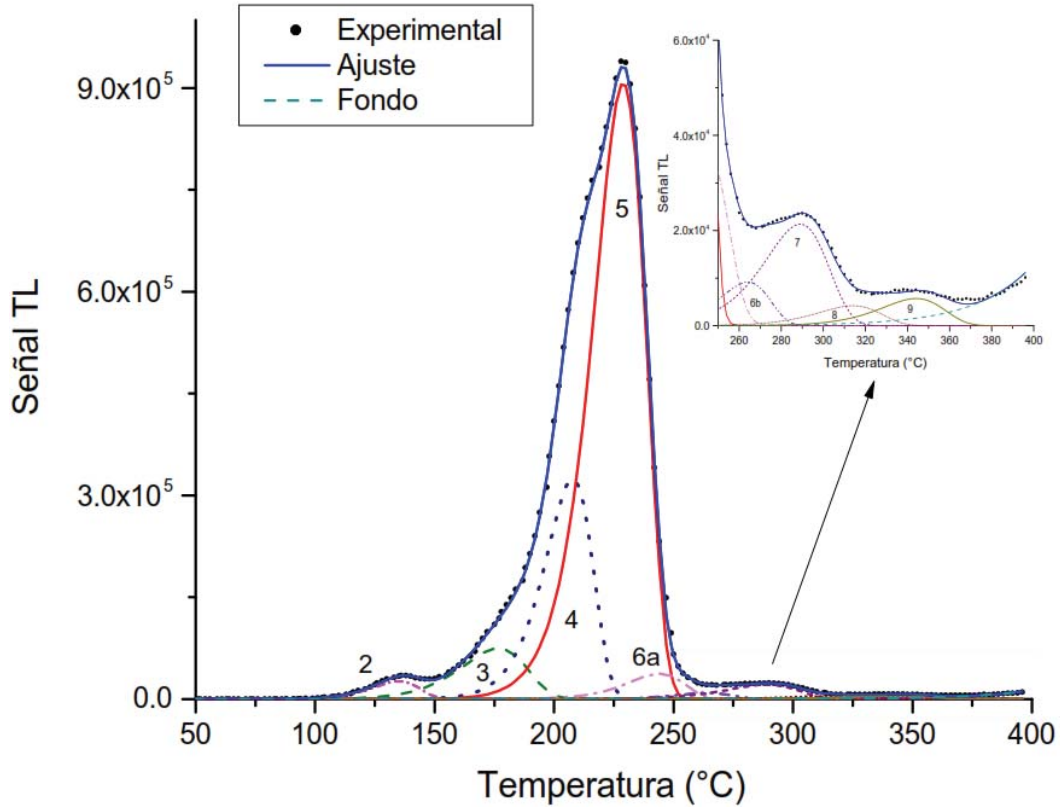


Figura 2.6 Deconvolución de curva de brillo típica para TLD-100 irradiado con electrones de 6 MeV a una dosis de 3 Gy.

En la tabla 2.2 se muestran los promedios de las temperaturas y de las energías de activación para cada uno de los picos y sus incertidumbres.

Tabla 2.2 Temperaturas y energía de activación para cada uno de los picos de la curva de brillo de TLD-100.

Pico	T (°C)	Energía de activación (eV)
2	137.9 ± 1.1	1.436 ± 0.014
3	179.4 ± 1.0	1.234 ± 0.009
4	210.9 ± 1.1	1.972 ± 0.014
5	232.1 ± 1.2	1.963 ± 0.013
6a	247.8 ± 1.1	1.904 ± 0.012
6b	269.0 ± 1.1	2.052 ± 0.012
7	292.4 ± 1.1	1.767 ± 0.010
8	318.5 ± 1.2	1.934 ± 0.010
9	347.8 ± 1.1	2.135 ± 0.010

Mercado-Uribe y Brandan (Mercado-Uribe y Brandan 2004) irradiaron TLD-100 con electrones de 20 keV encontrando energías de activación de los picos 5 y 7 de 4.0 y 3.0 eV, respectivamente, que son 100% y 70% mayores que los valores obtenidos. No se encontraron otras referencias con deconvolución de las curvas de brillo obtenidas para electrones.

Livingston y colaboradores (Livingston, y otros 2010) obtuvieron las energías de activación de los picos 5 (2.15 eV) y 7 (2.00 eV) de la curva de brillo de TLD-100 irradiados con rayos X de 100 keV. Estos valores son aproximadamente 10% y 13% mayores, respectivamente, que los valores obtenidos en este trabajo.

Por otro lado, Puchalska y colaboradores (Puchalska, Bilski y Olko, Thermoluminescence glowpeak parameters for LiF:Mg, Ti with modified activator concentration 2007) obtuvieron energías de activación de 2.0 eV para el pico 5 y de 1.61 eV para el pico 7 de la curva de brillo del dosímetro de LiF:Mg,Ti (MTS-N) irradiado con rayos gammas de ^{60}Co . Los valores son 2% mayor y 9% menor que los obtenidos en este trabajo para el pico 5 y el 7, respectivamente.

Las diferencias entre los valores reportados y los obtenidos en este trabajo pueden deberse al uso de diferentes calidades de haz, protocolos de horneado y calentamiento (que producen una región más angosta para los picos 4 y 5 de la curva de brillo) y deconvolución.

3 CÁLCULOS TEÓRICOS

3.1 Cálculo analítico

Para obtener la dosis promedio por unidad de fluencia en un dosímetro de LiF se realizó un cálculo analítico usando la aproximación de frenado continuo (CSDA) a partir de las ecuaciones (1.12) y (1.13) con la expresión siguiente:

$$\frac{D}{\phi} = \frac{T_e[1 - Y(T_e)] - T_f[1 - Y(T_f)]}{\rho d} \quad (3.1)$$

Para realizar el cálculo analítico se hizo incidir perpendicularmente un haz de electrones con energía inicial, T_0 , igual a una de las energías promedio mencionadas en la tabla 2.1, sobre un bloque de agua y se obtuvo el alcance R_{CSDA} para obtener el alcance residual, $R_{\text{res,a}} = R_{\text{CSDA,a}} - Z_{\text{ref}}$. La energía de entrada, T_e , al dosímetro es la energía de los electrones que tienen el alcance residual calculado como se muestra en la figura 3.1 a). Aplicando el mismo procedimiento con la energía de entrada y el alcance R_{CSDA} en LiF se calculó el alcance residual, $R_{\text{res,LiF}} = R_{\text{CSDA,LiF}} - \rho d$, en este material y a partir de éste se obtuvo la energía de los electrones a la salida, T_f , del dosímetro. Con las energías de entrada y salida del dosímetro, sus valores de producción de radiación: $Y(T_e)$ y $Y(T_f)$ y el espesor másico del material se obtuvo la dosis promedio por unidad de fluencia con la ecuación 3.1.

El procedimiento anterior se repitió para un bloque de agua, como se muestra en la figura 3.1 b en donde el alcance residual es $R_{\text{res,ba}} = R_{\text{CSDA,a}} - \rho d$. En ambos casos se utilizó un valor de d igual a 0.89 mm y no se tomó en cuenta el alargamiento de trayectoria porque para todas las energías de electrones utilizadas es menor que el 1%.

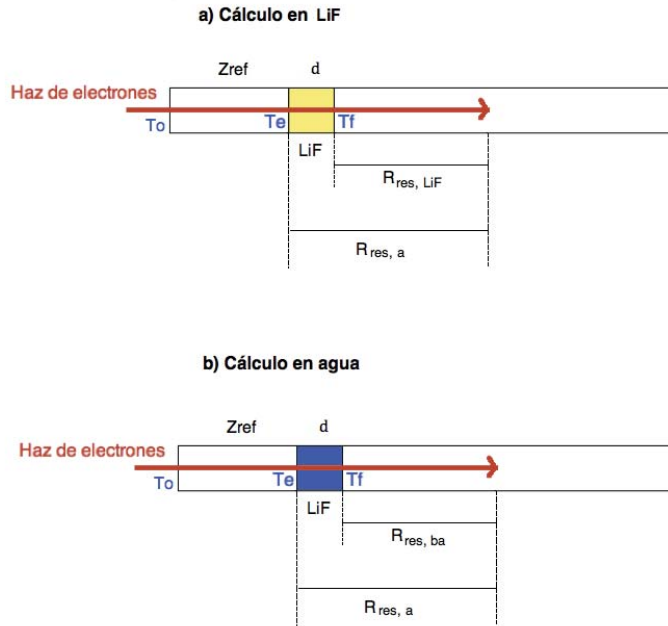


Figura 3.1 Esquema utilizado para el cálculo analítico de la irradiación con electrones para el LiF y agua.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan los datos utilizados para calcular la energía depositada en el LiF y en el bloque de agua. Los valores de producción de radiación $Y(T)$ y el alcance CSDA para las energías correspondientes en agua y LiF, se obtuvieron del Apéndice D.5 Poderes másicos de frenado para electrones, alcances, producción de radiación y correcciones de densidad del libro Introduction to radiological physics and radiation dosimetry (Attix 1986).

Tabla 3.1 Datos para el cálculo de la energía depositada en el dosímetro de LiF.

Z _{ref} (cm)	Energía promedio (MeV)	R _{CSDA,a} (g/cm ²)	R _{res,a} (g/cm ²)	T _e (MeV)	R _{CSDA,LiF} (g/cm ²)	R _{res,LiF} (g/cm ²)	T _s (MeV)	Y(T _e)	Y(T _s)
1.34	5.6	3.002	1.662	3.281	2.052	1.818	2.915	1.39E-02	1.22E-02
2.08	8.5	4.268	2.188	4.293	2.701	2.466	3.919	1.86E-02	1.69E-02
2.93	11.8	5.797	2.867	5.622	3.530	3.295	5.237	2.50E-02	2.32E-02
3.72	14.8	7.131	3.411	6.728	4.201	3.966	6.334	3.04E-02	2.85E-02
4.48	17.8	8.410	3.930	7.794	4.836	4.601	7.393	3.57E-02	3.37E-02

Tabla 3.2. Datos para el cálculo de la energía depositada en agua.

Z _{ref} cm	Energía promedio (MeV)	R _{CSDA,a} (g/cm ²)	R _{res,a} (g/cm ²)	T _e (MeV)	R _{CSDA,a} (g/cm ²)	R _{res,ba} (g/cm ²)	Energía T _s (MeV)	Y(T _e)	Y(T _s)
1.34	5.6	3.002	1.662	3.281	1.662	1.573	3.110	1.20E-02	1.14E-02
2.08	8.5	4.268	2.188	4.293	2.188	2.099	4.117	1.62E-02	1.54E-02
2.93	11.8	5.797	2.867	5.630	2.867	2.778	5.452	2.18E-02	2.10E-02
3.72	14.8	7.131	3.411	6.728	3.411	3.322	6.546	2.65E-02	2.57E-02
4.48	17.8	8.410	3.930	7.794	3.930	3.841	7.608	3.11E-02	3.03E-02

La energía depositada y la dosis promedio por unidad de fluencia en LiF y en el bloque de agua se muestran en la tabla 3.3. Se observa que la energía depositada en LiF es mayor que en agua pero la dosis promedio por unidad de fluencia es mayor en agua que en LiF para todas las energías de electrones utilizadas. Esto se debe a la diferencia en la densidad de los materiales (2.365 g/cm³ para LiF vs. 1 g/cm³ para agua).

Para gammas de ⁶⁰Co la dosis por unidad de fluencia está dada por el coeficiente másico de absorción de energía, los valores de μ_{en}/ρ se obtuvieron del Apéndice D.3 (Attix 1986).

Tabla 3.3 Energía depositada y dosis por unidad de fluencia en LiF y en el bloque de agua.

Energía promedio (MeV)	LiF		Agua	
	E_{LiF} (MeV)	$(D/\Phi)_{LiF}$ (MeV·cm ² /g)	E_a (MeV)	$(D/\Phi)_a$ (MeV·cm ² /g)
5.6	0.356	1.520	0.167	1.874
8.5	0.360	1.534	0.170	1.908
11.8	0.366	1.559	0.170	1.910
14.8	0.370	1.576	0.172	1.935
17.8	0.372	1.586	0.174	1.954
		μ_{en}^{LiF} / ρ	μ_{en}^{agua} / ρ	
1.25*		0.0247	0.0296	

* Energía de las gammas de ⁶⁰Co.

Se calculó el cociente de la dosis promedio por unidad de fluencia en LiF y agua, $(D/\Phi)_{LiF}/(D/\Phi)_a$ para cada una de las energías de electrones y para las gammas de ⁶⁰Co. Finalmente se calculó la respuesta relativa dada en la tabla 3.4 con la relación

$$RR = \frac{\left(\left(\frac{D}{\Phi} \right)_a^{LiF} \right)_E}{\left(\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{agua}^{LiF} \right)_{^{60}Co}} \quad (3.2)$$

Tabla 3.4 Respuesta relativa determinada con el cálculo analítico.

Energía promedio (MeV)	$(D/\Phi)_{LiF}/(D/\Phi)_a$	Respuesta relativa
5.6	0.811	0.973
8.5	0.804	0.965
11.8	0.816	0.980
14.8	0.814	0.977
17.8	0.812	0.974
1.25	0.833	1

* Energía de las gammas de ^{60}Co .

Las respuestas relativas obtenidas no tienen incertidumbre porque los datos para los cálculos se tomaron de un libro (Attix 1986) que no incluye incertidumbres.

3.2 Cálculo Monte Carlo

Los métodos Monte Carlo son algoritmos computacionales que utilizan números generados aleatoriamente y distribuciones de probabilidad para modelar muchos fenómenos físicos, entre ellos la interacción de la radiación ionizante con la materia.

En la simulación Monte Carlo del transporte de radiación, la trayectoria de una partícula es vista como una secuencia aleatoria de desplazamientos libres que terminan con un evento de interacción donde la partícula cambia su dirección de movimiento, pierde energía y en ocasiones produce partículas secundarias. Todo ello de acuerdo a las leyes de la física y las probabilidades involucradas dependiendo del medio, la energía de la partícula y condiciones específicas como la geometría de la fuente o del mismo medio (Rojas 2005).

Uno de los códigos Monte Carlo utilizados en aplicaciones médicas es PENELOPE (Penetration and Energy Loss of Positrons and Electrons) que simula el transporte acoplado de electrones, positrones y fotones en casi cualquier medio material homogéneo, en un intervalo de energía de 50 eV a 1 GeV. En el algoritmo de los electrones y los positrones se utiliza un esquema

mixto que consiste en combinar la simulación detallada, para los eventos con grandes ángulos de deflexión o grandes pérdidas de energía, y la utilización de simulación condensada para el resto de eventos (Salvat, Fernández-Varea y Sempau 2011).

PENELOPE está formado por un paquete de subrutinas que no se puede operar directamente, de manera que el usuario tiene que realizar un programa para llamar a las subrutinas que llevan a cabo la simulación. Además, se debe generar un archivo que contenga la información de la geometría del sistema y uno con los datos de los materiales involucrados.

3.2.1 Simulación con PENELOPE

Se realizó el archivo que contiene la geometría de la irradiación con las siguientes especificaciones: distancia fuente superficie de 100 cm, área del maniquí de $30 \times 30 \text{ cm}^2$ y $8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ de material dispersor, ver figura 3.2. Los materiales utilizados fueron LiF para el TLD y agua para el maniquí, el cálculo de dosis se realizó a la profundidad de referencia que se determinó en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional para cada una de las energías del haz de electrones.

El programa PENELOPE arroja los valores de la energía depositada, por unidad de fluencia, en el LiF y en agua para cada uno de los haces de electrones y los rayos gamma del ^{60}Co mostrados en la tabla 3.5.

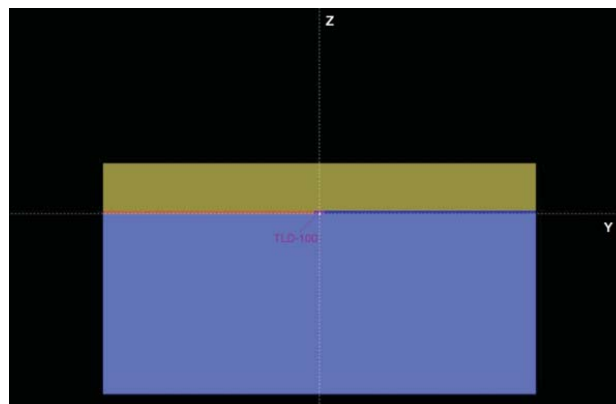


Figura 3.2 Geometría del maniquí irradiado con electrones de alta energía usando PENELOPE.

Tabla 3.5. Energía depositada en el LiF y en agua

Energía promedio (MeV)	Energía (eV)	
	LiF	agua
5.6	75.77 ± 0.40	35.73 ± 0.19
8.5	76.80 ± 0.53	36.03 ± 0.24
11.8	72.96 ± 0.43	34.76 ± 0.28
14.8	70.26 ± 0.50	33.46 ± 0.24
17.8	68.89 ± 0.53	32.39 ± 0.26
1.25*	9.00 ± 0.05	4.15 ± 0.03

* Este valor corresponde a la energía promedio de las gammas de ^{60}Co .

Se observa que la energía depositada en agua es menor que la depositada en el dosímetro para todas las energías utilizadas lo que coincide con los resultados del cálculo analítico de la tabla 3.3.

A partir de la información de la tabla 3.5 y de la masa del dosímetro se obtuvo la dosis por unidad de fluencia presentada en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Dosis en LiF y agua

Energía promedio MeV	Dosis (eV/g)					
	LiF			agua		
5.6	3202.56	±	16.91	3986.71	±	21.20
8.5	3245.96	±	22.54	4020.10	±	26.78
11.8	3083.67	±	18.32	3878.43	±	30.87
14.8	2969.73	±	21.13	3733.76	±	26.78
17.8	2911.85	±	22.54	3614.44	±	28.64
1.25	380.40	±	1.97	463.08	±	2.79

Para todas las energías de electrones utilizadas la dosis por unidad de fluencia es mayor en el dosímetro que en agua.

De las dosis por unidad de fluencia calculadas para el LiF y el agua se calculó la respuesta relativa con su respectiva incertidumbre, tabla 3.7, con la ecuación (2.1).

Tabla 3.7 Respuesta Relativa obtenida a partir de la simulación Monte Carlo

Energía MeV	Respuesta Relativa		
5.6	0.978	±	0.011
8.5	0.983	±	0.012
11.8	0.968	±	0.012
14.8	0.968	±	0.012
17.8	0.981	±	0.013
1.25	1.000	±	0.011

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Curvas de brillo

En la figura 4.1, se muestran algunas de las curvas de brillo que se obtuvieron experimentalmente al irradiar a diferentes dosis TLD-100 con electrones de 6 MeV.

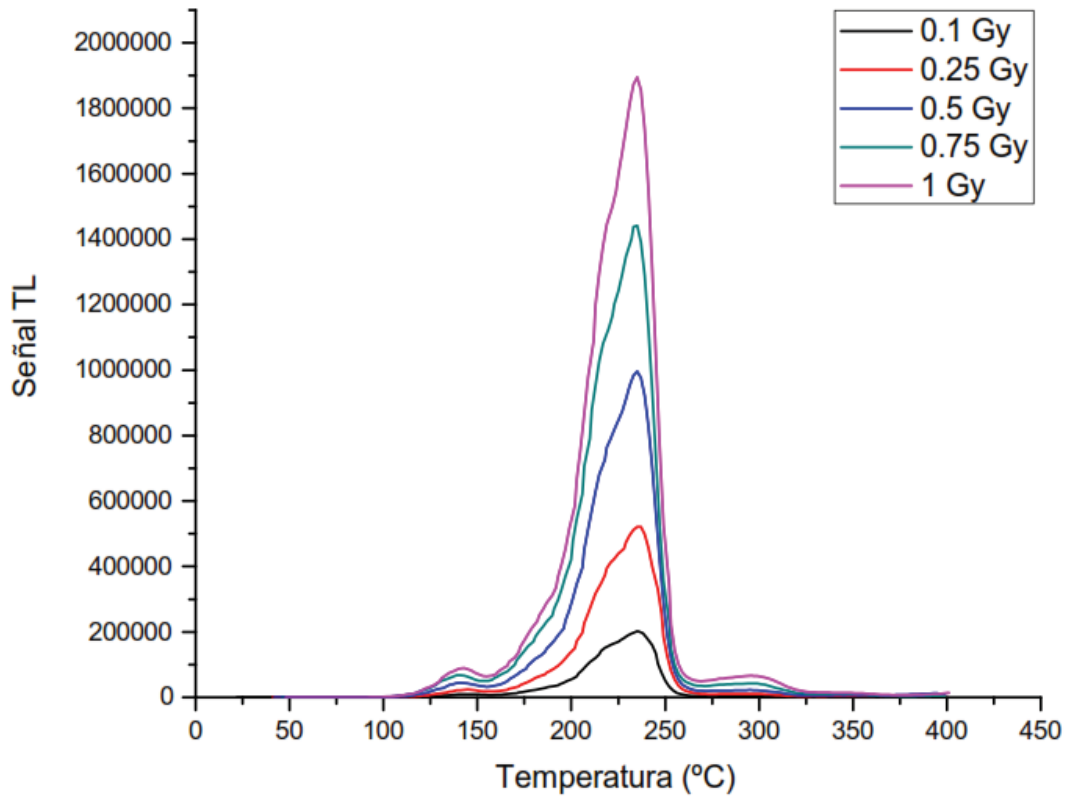


Figura 4.1 Curvas de brillo de TLD-100 irradiado con electrones de 6 MeV

Se observa en la figura 4.1 que conforme aumenta la dosis, la intensidad de la señal termoluminiscente aumenta cuando se irradia el TLD-100 con electrones de 6 MeV. Para las otras energías de electrones utilizadas se tiene el mismo comportamiento.

Como se muestra en la figura 4.2, no se ven diferencias en la forma de la curva de brillo obtenida para todos los haces utilizados; mientras que la altura del pico 5 obtenida para los electrones a una dosis en agua de 0.5 Gy es menor que la correspondientes a las gammas para 0.55 Gy.

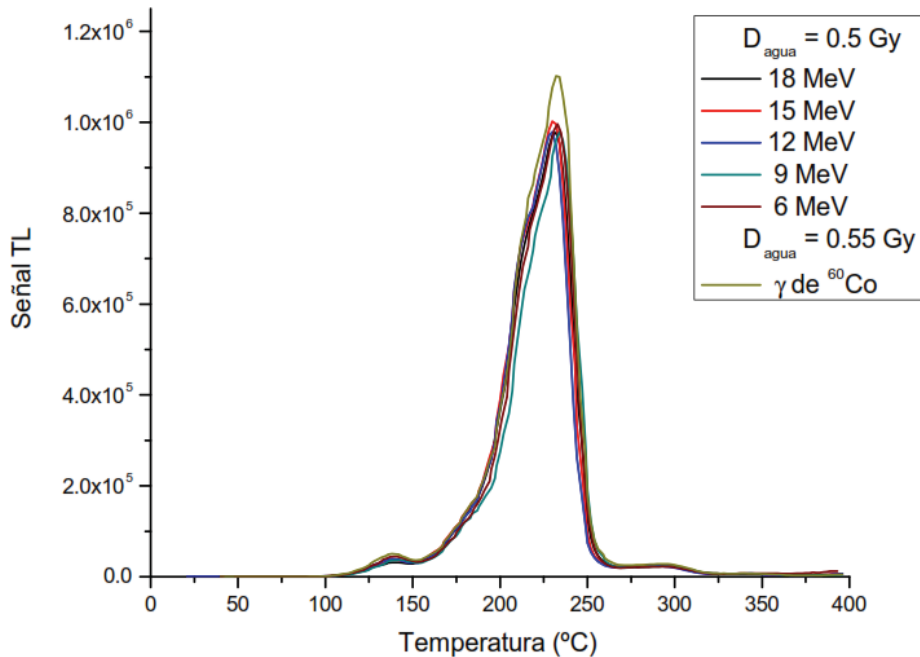


Figura 4.2 Curvas de brillo de TLD-100 irradiado con electrones y gammas de ^{60}Co .

4.2 Linealidad

La respuesta termoluminiscente, para el área bajo la curva de brillo, de los dosímetros TLD-100 irradiados con electrones con energías nominales de 6, 9, 12, 15 y 18 MeV en el HO-CMNSXXI es lineal para dosis entre 0.1 Gy y 1 Gy para todas las energías como se observa en la figura 4.3. Para dosis mayores que 1 Gy y menores que 5 Gy la respuesta termoluminiscente presentó un comportamiento supralineal en función de la dosis. Además, hay una dependencia de la respuesta TL con la energía de los electrones.

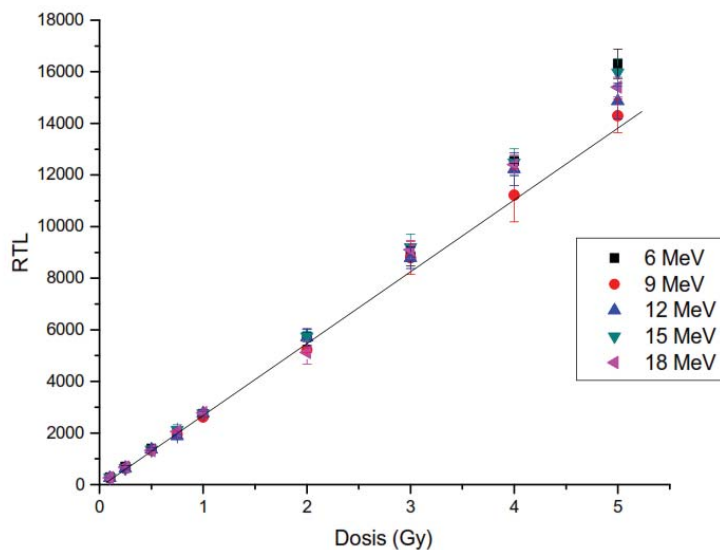


Figura 4.3 Respuesta termoluminiscente del área bajo la curva de brillo en función de la dosis en agua impartida para cada una de las energías de los haces de electrones.

También se obtuvo la respuesta termoluminiscente, para el área bajo la curva de brillo, para gammas de ^{60}Co como función de la dosis en agua, ver figura 4.4, se tiene que la *RTL* es lineal dentro de los valores de dosis utilizados.

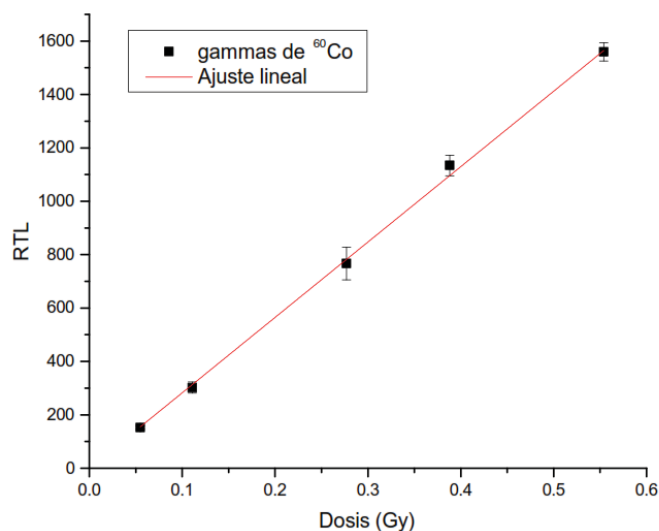


Figura 4.4 Respuesta termoluminiscente del área bajo la curva de TLD-100 en función de la dosis en agua para gammas de ^{60}Co .

De la deconvolución realizada a las curvas de brillo de TLD-100 se obtuvieron las respuestas TL en función de la dosis de los picos de la curva de brillo,

mostradas en las figuras 4.5 a 4.9 para las energías nominales 6 a 18 MeV, respectivamente, en las que se observa que al menos los picos 4, 5 y 6a tienen un comportamiento lineal a dosis bajas.

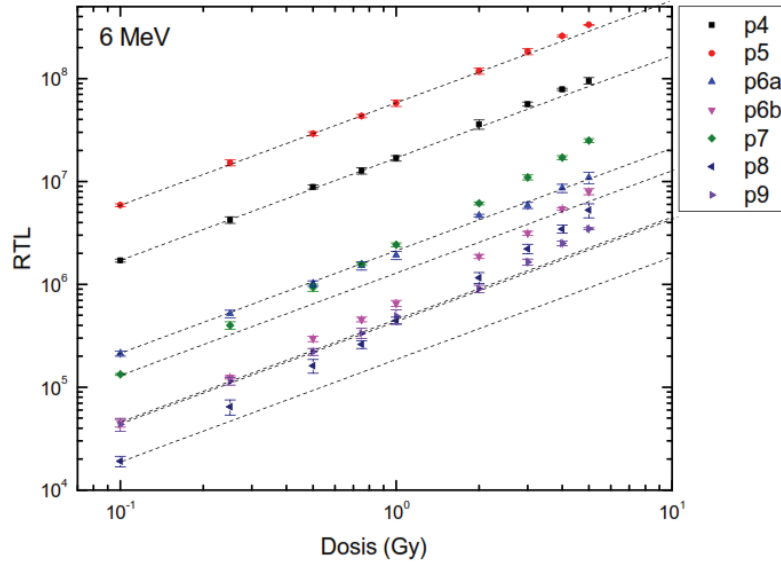


Figura 4.5 Respuesta termoluminiscente en función de las dosis en agua utilizadas para cada uno de los picos de la curva de brillo de TLD-100 irradiados con electrones de 6 MeV. La recta corresponde a una respuesta lineal.

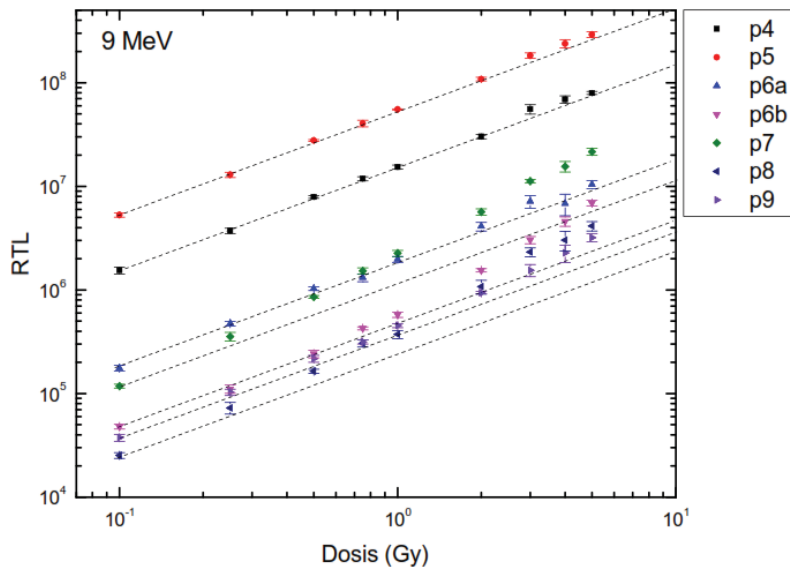


Figura 4.6 Respuesta termoluminiscente en función de las dosis en agua utilizadas para cada uno de los picos de la curva de brillo de TLD-100 irradiados con electrones de 9 MeV. La recta corresponde a una respuesta lineal.

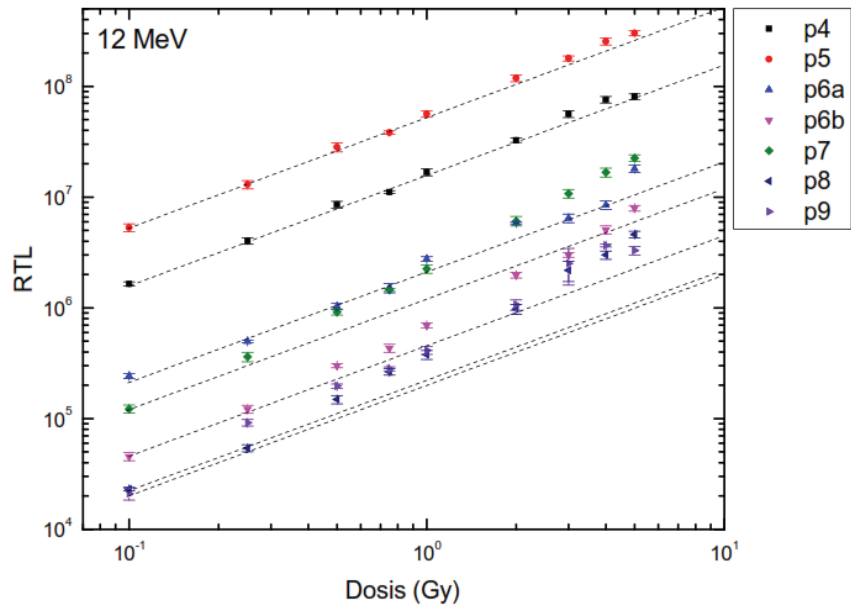


Figura 4.7 Respuesta termoluminiscente en función de las dosis en agua utilizadas para cada uno de los picos de la curva de brillo de TLD-100 irradiados con electrones de 12 MeV. La recta corresponde a una respuesta lineal.

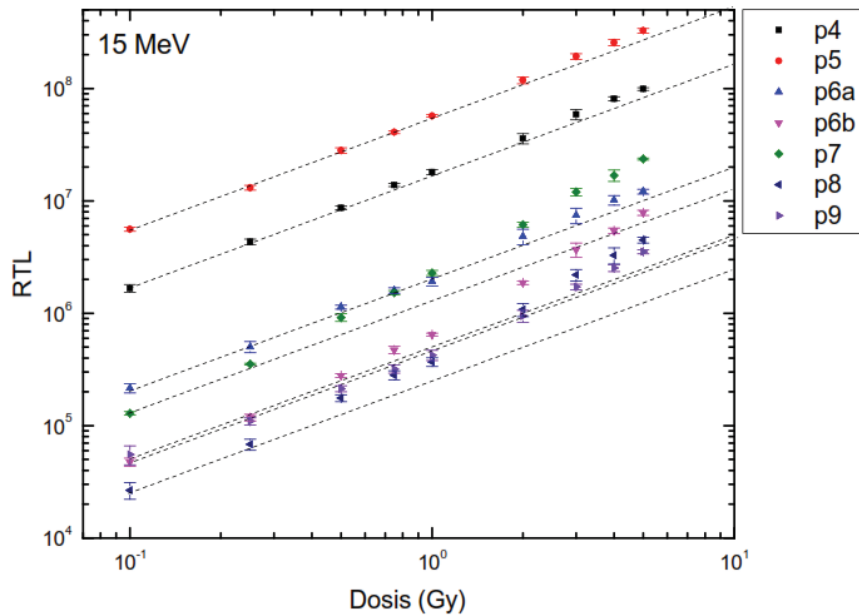


Figura 4.8 Respuesta termoluminiscente en función de las dosis en agua utilizadas para cada uno de los picos de la curva de brillo de TLD-100 irradiados con electrones de 15 MeV. La recta corresponde a una respuesta lineal.

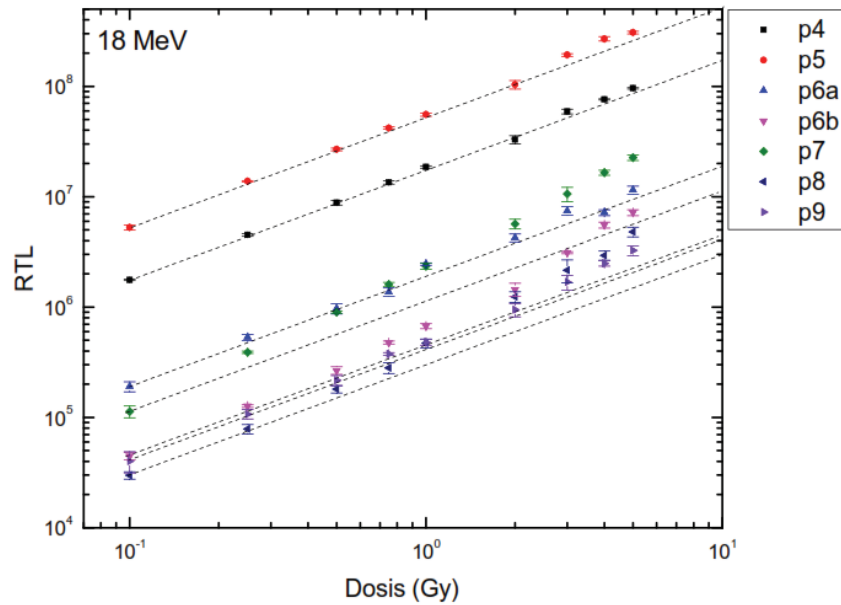


Figura 4.9 Respuesta termoluminiscente en función de las dosis en agua utilizadas para cada uno de los picos de la curva de brillo de TLD-100 irradiados con electrones de 18 MeV. La recta corresponde a una respuesta lineal.

En la figura 4.10 se presenta la respuesta TL como función de la dosis en agua de los picos 5, 7 y 8, teniéndose que el pico 5 tiene una respuesta lineal-supralineal, en tanto que los picos 7 y 8 son supralineales en el intervalo de dosis estudiado. Se observa que hay una dependencia con la energía del haz incidente, lo cual también ocurre para la RTL de los picos 4, 6a, 6b y 9.

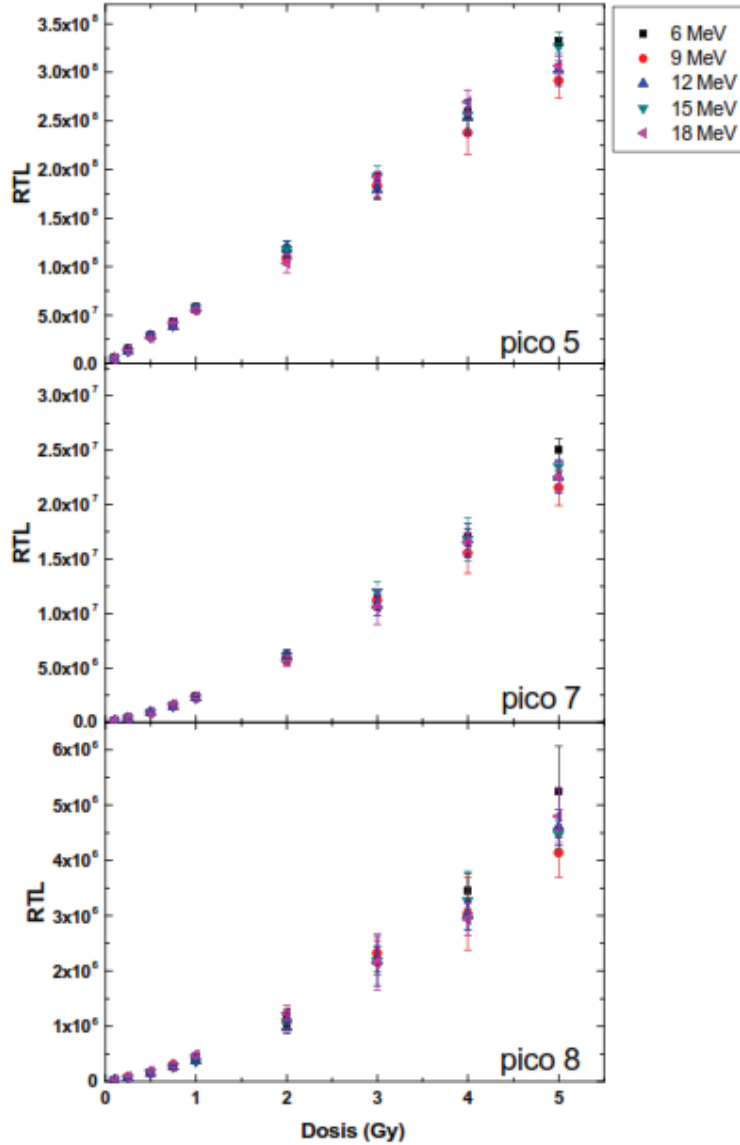


Figura 4.10 Respuesta termoluminiscente de los picos 5, 7 y 8 de la curva de brillo en función de la dosis en agua impartida para cada una de las energías de los haces de electrones.

Para determinar de manera más precisa el comportamiento de la respuesta TL como función de la dosis, se utiliza la función de respuesta $f(D)$, o factor de supralinealidad, definida por (Furetta, Handbook of Thermoluminescence 2010):

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1} \quad (4.1)$$

donde $F(D)$ es la respuesta TL obtenida a una dosis D y $F(D_l)$ es la respuesta TL obtenida a una dosis baja D_l para la cual $F(D)$ es lineal.

El valor de $f(D) = \left(\frac{dF(D)}{dD}\right) / \left(\frac{dF(D_l)}{dD_l}\right)$ es la pendiente de la curva de la RTL como función de la dosis a una dosis D normalizada por la pendiente de la curva a una dosis D_l .

$$\text{Si } \begin{cases} f(D) = 1 & \text{la respuesta es lineal} \\ f(D) > 1 & \text{la respuesta es supralineal} \\ f(D) < 1 & \text{la respuesta es sublineal} \end{cases} \quad (4.2)$$

En la figura 4.11 se muestra la función $f(D)$ del área bajo la curva de brillo y los picos de baja temperatura (4 a 6a) y en la figura 4.12 se presenta la función de supralinealidad para los picos de alta temperatura (6b a 9) de la curva de brillo de los dosímetros TLD-100 irradiados electrones; ésta se obtuvo de los datos presentados en las figuras 4.3 y 4.5 a 4.9.

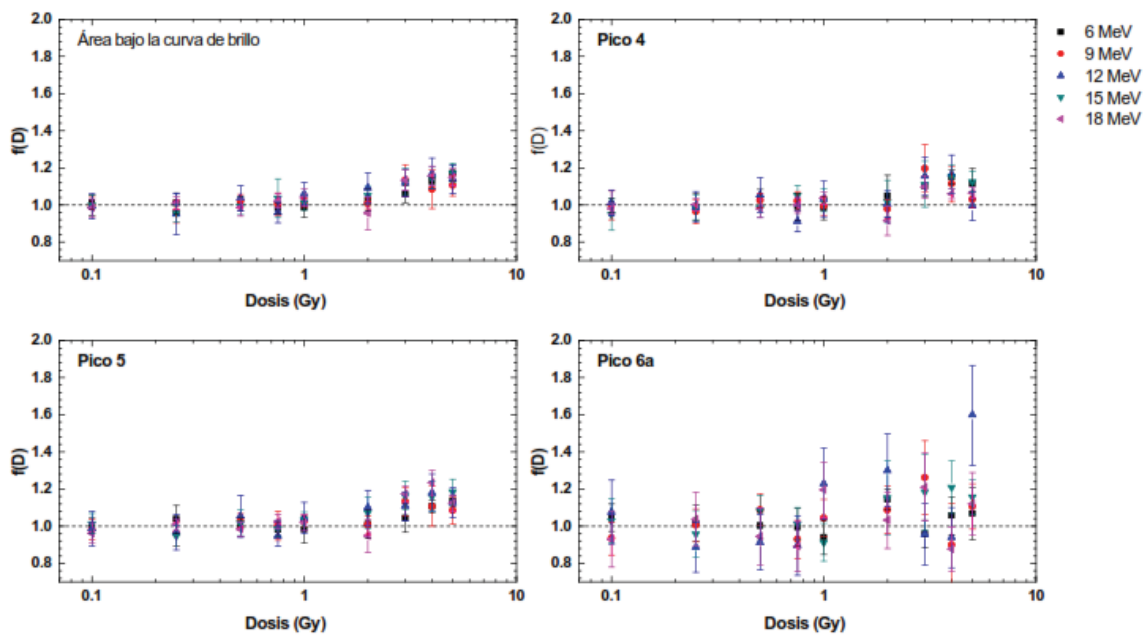


Figura 4.11 Función de supralinealidad del área bajo la curva de brillo y los picos de baja temperatura de la curva de brillo de TLD-100 irradiado con electrones.

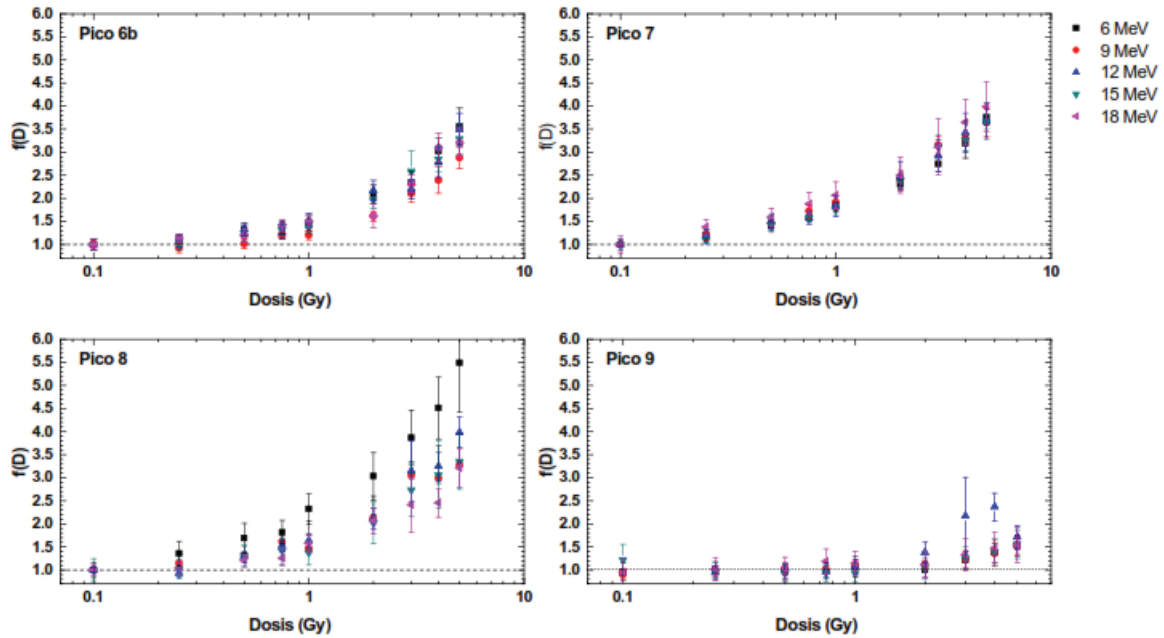


Figura 4.12 Función de supralinealidad de los picos de alta temperatura de la curva de brillo de TLD-100 irradiado con electrones.

De la figuras 4.11 y 4.12 se observa que, en general, para todas las energías, tanto el área bajo la curva de brillo como los picos 4, 5, 6a y 9 tienen una respuesta lineal hasta aproximadamente 1 Gy y a dosis más altas la respuesta es supralineal. Para los picos 6b, 7 y 8 la respuesta es supralineal en el intervalo de dosis estudiado por lo que la $f(D)$ se calculó normalizando con respecto a la dosis menor (0.1 Gy).

Para el área bajo la curva de brillo y los picos 4, 5, 6a, 6b, 7 y 9 la $f(D)$ es aproximadamente independiente de la energía del haz de electrones. Las discrepancias que se observan a una energía de 12 MeV con respecto a las demás en los picos 6a y 9 pueden deberse a la dificultad de su ajuste durante la deconvolución.

Con respecto al pico 8, la supralinealidad tiende a disminuir al aumentar la energía del haz. El hecho de que la $f(D)$ del pico 8 dependa de la calidad del haz, y la del resto de los picos no, se ha observado para TLD-100 irradiado con rayos X de baja energía (15 kV con energía efectiva de 8.0 keV y 35 kV con energía efectiva de 8.1 keV) (Gamboa-deBuen, y otros 1998).

4.3 Respuesta relativa

El cálculo de la respuesta relativa para cada uno de los haces de electrones se realizó únicamente en donde la respuesta termoluminiscente del dosímetro TLD-100 en función de la dosis es lineal.

Las respuestas relativas obtenidas de los datos experimentales obtenidos en el HO-CMNS XXI se presentan en la tabla 4.1. Todas las respuestas relativas son menores que 1 lo que significa que cuando se irradian TLD-100 a la misma dosis en agua, la cantidad de luz emitida es menor para electrones que para gammas de ^{60}Co . La respuesta relativa menor fue para los electrones de 8.5 MeV y la mayor para electrones de 14.8 MeV.

Tabla 4.1 Respuesta Relativa obtenida a partir de los datos experimentales del HO-CMNS XXI

Energía (MeV)	Respuesta relativa
5.6	0.973 ± 0.025
8.5	0.923 ± 0.022
11.8	0.944 ± 0.051
14.8	0.979 ± 0.029
17.8	0.971 ± 0.029

Se realizó un análisis estadístico con la distribución t de Student (muestras pequeñas) de las respuestas relativas de la tabla 4.1 y se encontró que no hay diferencia estadística significativa entre las respuestas relativas medidas para 5.6, 11.8, 14.8 y 17.8 MeV dentro de un nivel de confianza del 0.05. Lo anterior implica que la respuesta relativa de TLD-100 es independiente de la energía excepto en el caso de 8.5 MeV.

En la tabla 4.2 se condensaron los valores de la respuesta relativa de TLD-100 irradiado con electrones de alta energía que se midieron en este trabajo para el área bajo la curva de brillo y los cálculos Monte Carlo y analítico.

Tabla 4.2 Respuesta relativa de TLD-100 irradiado con electrones de alta energía obtenida experimentalmente, con un cálculo Monte Carlo y con un cálculo analítico.

Energía (MeV)	Respuesta relativa		
	Experimental	Cálculo Monte Carlo	Cálculo analítico
5.6	0.973 ± 0.025	0.978 ± 0.011	0.973
8.5	0.923 ± 0.022	0.983 ± 0.012	0.965
11.8	0.944 ± 0.051	0.968 ± 0.012	0.980
14.8	0.979 ± 0.029	0.968 ± 0.012	0.977
17.8	0.971 ± 0.029	0.981 ± 0.013	0.974

Los valores obtenidos con el cálculo analítico no tienen incertidumbres porque se realizaron con los datos del Apéndice D.5 Poderes másicos de frenado para electrones, alcances, campos de radiación y correcciones de densidad del libro Introduction to radiological physics and radiation dosimetry (Attix 1986). Para los datos experimentales y el cálculo Monte Carlo se calculó la incertidumbre combinada correspondiente.

Para comparar los resultados teóricos determinados con la simulación Monte Carlo y el cálculo analítico, con los obtenidos experimentalmente se obtuvo la diferencia porcentual con respecto a éstos que se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Diferencia porcentual entre los resultados experimentales de la respuesta relativa del área bajo la curva y los obtenidos teóricamente.

Energía nominal (MeV)	Diferencia porcentual	
	Monte Carlo	Cálculo analítico
6	0.5 %	0.0 %
9	6.5 %	4.5 %
12	2.5 %	3.8 %
15	1.1 %	0.2 %
18	1.0 %	0.3 %

Se observa que existe una diferencia porcentual entre el Monte Carlo y el cálculo analítico con respecto a los resultados experimentales menor que el 5%, salvo para la respuesta relativa medida y calculada con Monte Carlo para

9 MeV, por lo se puede concluir que, salvo para este caso, los cálculos concuerdan con los resultados experimentales dentro del 5%.

En la figura 4.13 se muestran las respuestas relativas en función de la energía del haz de electrones. Se observa que para las tres metodologías utilizadas (experimental, Monte Carlo y analítico) el valor de la respuesta relativa es menor que 1 es decir con los tres métodos se obtiene que la respuesta termoluminiscente de TLD-100 irradiado con electrones es menor que la de gammas de ^{60}Co .

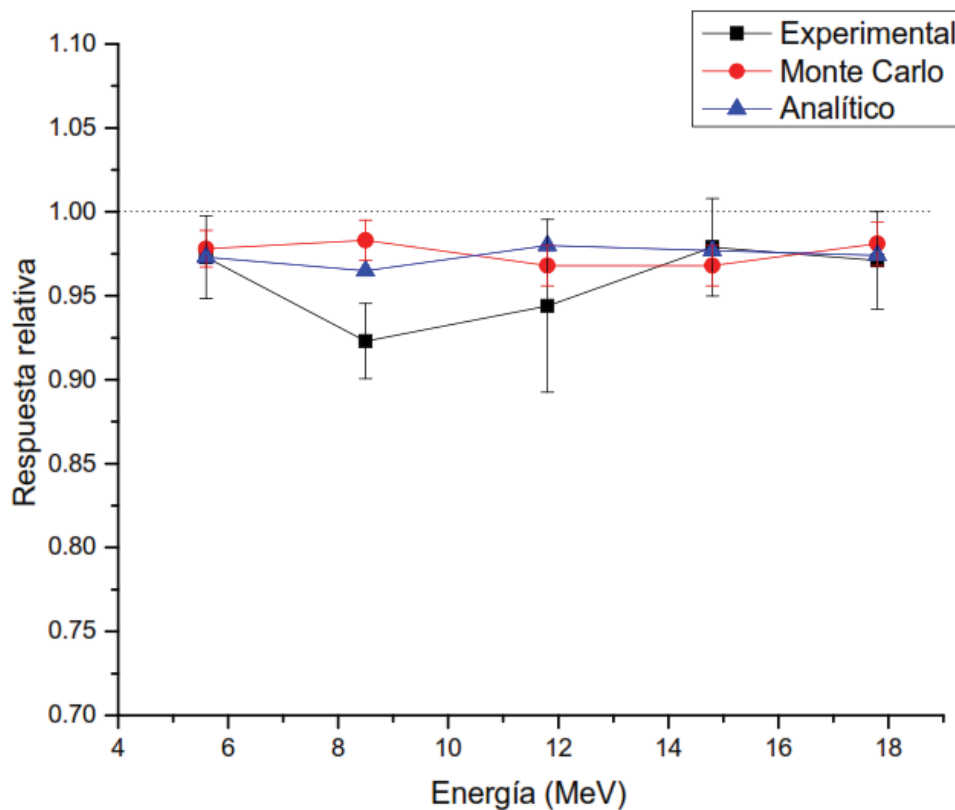


Figura 4.13 Respuesta Relativa en función de la energía para los diferentes haces de electrones medida para el área bajo la curva de brillo, calculada teóricamente con PENELOPE y un cálculo analítico.

Comparando los valores experimentales de la respuesta relativa con los encontrados en la literatura que se muestran en la figura 4.14 se observa que los resultados de este trabajo concuerdan dentro, del 3.5%, con los reportados, excepto con los medidos por Nunes y Campos (Nunes y Campos 2008). Las variaciones en los valores se deben probablemente que los dosímetros de

LiF:Mg,Ti son de diferente fabricación (TLD-100, TLD-700, MTS-N y DTL937) y forma (polvo, tabletas o cilindros) y a las diferencias en los protocolos de preparación, irradiación y lectura, tales como que las irradiaciones se hicieron en materiales diferentes por ejemplo poliestireno o PMMA.

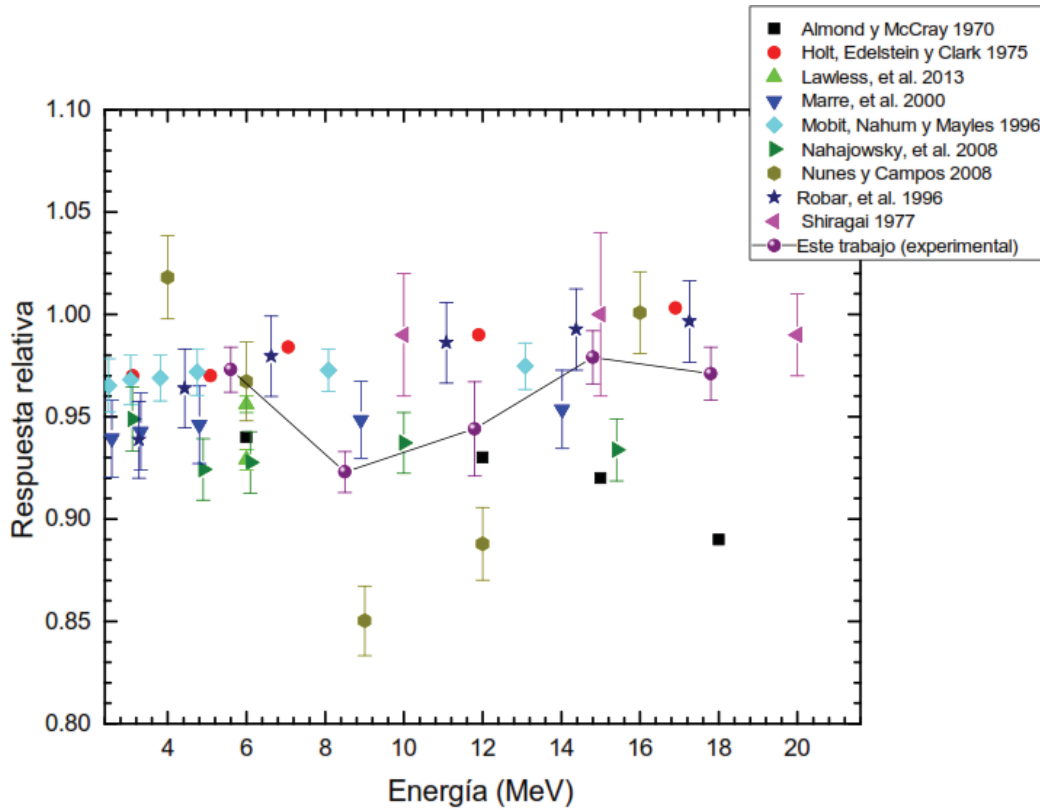


Figura 4.14 Respuesta relativa en función de la energía de los electrones utilizados durante la irradiación de los dosímetros termoluminiscentes.

También se calculó la respuesta relativa con la ecuación (2.5) para cada uno de los picos de la curva de brillo en donde la respuesta termoluminiscente en función de la dosis es lineal, estos picos son únicamente el 4, el 5, el 6a y el 9 los valores obtenidos se graficaron y se muestran en la figura 4.15.

Los demás picos: 6b, 7 y 8 presentan un comportamiento supralineal de la respuesta termoluminiscente en función de la dosis para todas las energías de electrones utilizados.

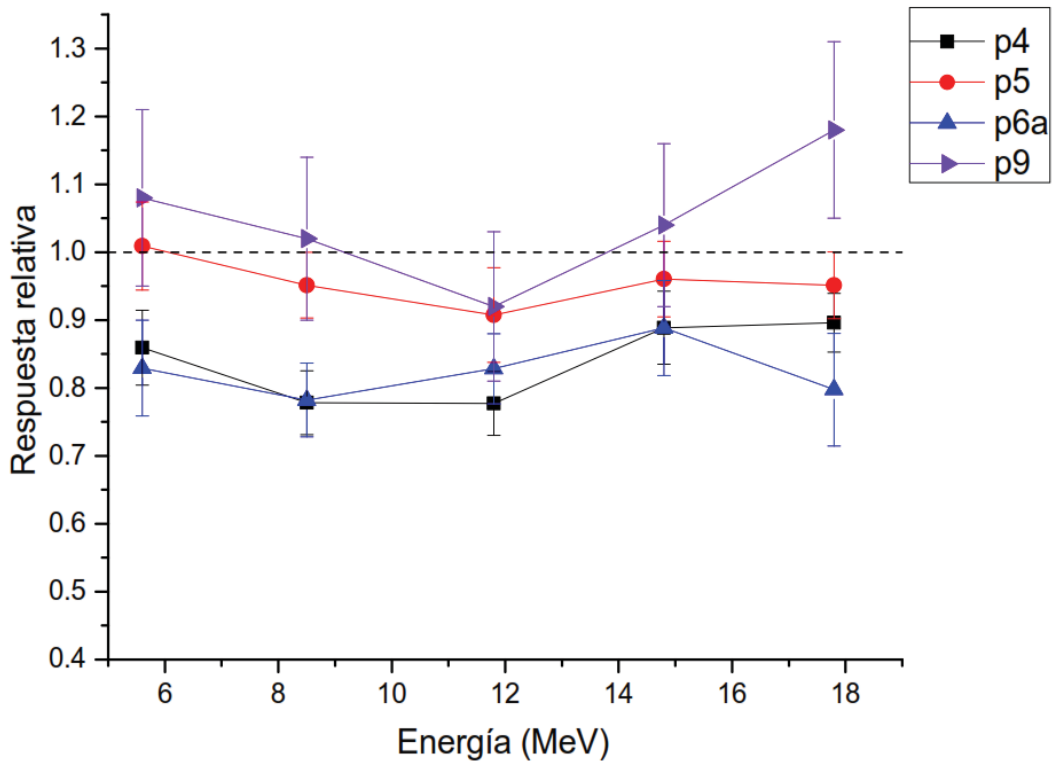


Figura 4.15 Respuesta relativa para cada uno de los picos que componen la curva de brillo que tienen comportamiento lineal de TLD-100 irradiado con electrones de alta energía.

Se observa en la figura 4.15 que para los picos 4, 5 y 6a la respuesta relativa es menor o igual que 1, en el caso del pico 9 la respuesta relativa es, mayor que 1, excepto para 11.8 MeV. El hecho de que la respuesta relativa de los picos de alta temperatura sea mayor que la de los picos de baja temperatura de la curva de brillo de TLD-100 ha sido observado para irradiación del TLD-100 con rayos X de baja energía (Ixquiac-Cabrera, y otros 2011). En el caso de la respuesta del TLD-100 expuesto a iones pesados, se ha reportado que la eficiencia relativa (respuesta TL por unidad de dosis en el dosímetro medida para los iones entre el mismo cociente obtenido para rayos gamma de ^{60}Co) de los picos de baja temperatura es menor o igual que 1 y es mayor que 1 para los picos de alta temperatura de la curva de brillo (Massillon-JL, Gamboa-deBuen y Brandan 2006).

5 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se obtuvieron la respuesta como función de la dosis y la respuesta relativa del área bajo la curva de brillo y de los picos que la componen, así como su factor de supralinealidad en función de la dosis para TLD-100 irradiado con electrones de alta energía: 6, 9, 12, 15 y 18 MeV.

Además de las mediciones realizadas en el HO-CMNSXXI se realizaron un cálculo analítico y uno Monte Carlo para obtener teóricamente los valores de la respuesta relativa y compararlos con los experimentales.

La importancia de este trabajo radica en que los resultados de este trabajo se pueden aplicar en cualquier situación en la que se utilicen haces de electrones durante la práctica médica, ya que se necesita conocer con precisión y exactitud la dosis. Para esto se pueden utilizar dosímetros termoluminiscentes de LiF:Mg,Ti. En el caso en que los dosímetros sean calibrados para una radiación de referencia, como rayos gamma de ^{60}Co o una energía de electrones, la respuesta relativa obtenida proporciona el factor de corrección por energía para tomar en cuenta la diferencia entre la respuesta del TLD-100 irradiado con la energía de los electrones utilizada y la radiación de referencia.

Se puede concluir que:

La respuesta termoluminiscente para el área bajo la curva de brillo varía en forma lineal para las dosis entre 0.1 y 1 Gy. Para las dosis mayores que 1 Gy la respuesta termoluminiscente presenta un comportamiento supralineal.

La respuesta termoluminiscente de los picos 4, 5, 6a y 9 de las curvas de brillo de TLD-100 varía en forma lineal con la dosis en el intervalo de 0.1 a 1 Gy, después de este último valor el comportamiento es supralineal para todas las energías de electrones utilizadas. Para los picos 6b, 7, 8 el comportamiento es supralineal para todo el intervalo de dosis utilizado.

Los promedios de la respuesta relativa del área bajo la curva de brillo de TLD-100 medida son estadísticamente iguales para las energías nominales de 6, 12, 15 y 18 MeV con un nivel de confianza de 0.05, lo que implica que la respuesta relativa de TLD-100 es independiente de la energía en el intervalo de

dosis de 0.1 a 1 Gy, lo anterior no ocurre para la energía de 9 MeV. Las respuestas relativas medidas concuerdan, dentro del 3.5%, con los valores reportados en la literatura, excepto con los medidos por Nunes y Campos.

De un análisis estadístico se determinó que las respuestas relativas del pico 5 y del pico 6a son independientes de la energía del haz de electrones dentro de un nivel de confianza del 0.05.

Los valores de la respuesta relativa obtenidos con el cálculo analítico y la simulación Monte Carlo concuerdan con los resultados experimentales con una diferencia porcentual menor o igual que 4.5%, para las energías nominales de electrones de 6, 12, 15 y 18 MeV. La mayor diferencia porcentual se obtuvo para los electrones de 9 MeV y es de 6.5 %

Esta investigación se puede extender para dosis menores que 0.1 Gy con las mismas energías de electrones para determinar si la respuesta de los picos de alta temperatura (6b, 7 y 8) tienen una respuesta lineal y, si es el caso, determinar su respuesta relativa.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Almond, P R, y K McCray. «The energy response of LiF, CaF₂ and Li₂B₄O₇:Mn to high energy radiations.» *Phys. Med. Biol.* 15 (1970): 335-42.
- Almond, Peter R, y otros. «AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams.» *Medical Physics* 26, n° 9 (September 1999).
- Attix, Frank Herbert. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Wiley-Interscience Publication, 1986.
- Furetta, Claudio. *Handbook of Thermoluminescence*. 2a. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010.
- Furetta, Claudio, y Pao-Sheng Weng. *Operational Thermoluminescence Dosimetry*. Singapore: World Scientific, 1998.
- Gamboa-deBuen, I, AE Buenfil, CG Ruiz, M Rodríguez-Villafuerte, A Flores, y ME Brandan. «Thermoluminescent response and relative efficiency of TLD-100 exposed to low-energy x-rays.» *Phys. Med. Biol.* 43 (1998): 2073-2083.
- Gerbi, Bruce J, y otros. «Recommendations for clinical electron beam dosimetry: Supplement to the recommendations of Task Group 25.» *Medical Physics AAPM* 36, n° 7 (2009): 3239-3279.
- Hogstrom, Kenneth R, y Peter R Almond. «Review of electron beam therapy physics.» *Physics in Medicine and Biology* 51 (2006): R455-R489.
- Holt, J G, G R Edelstein, y T E Clark. «Energy dependence of the response of LiF TLD rods in high energy electrons fields.» *Phys. Med. Biol.* 4 (1975): 559-70.
- International Atomic Energy Agency IAEA. *Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water*. Viena: TRS-398, 2001.
- Ixquiac-Cabrera, JM, ME Brandan, A Martínez-Dávalos, M Rodríguez-Villafuerte, C Ruiz-Trejo, y I Gamboa-deBuen. «Effect of spectral shape in the relative efficiency of LiF: Mg,Ti exposed to 20 keV effective energy X-rays.» *Radiation Measurements* 46, 2011: 389-395.
- Lawless, Michael J, Stephanie Junell, Cliff Hammer, y Larry A DeWerd. «Response of TLD-100 in mixed fields of photons and electrons.» *Medical Physics* 40, n° 1 (January 2013).

- Livingston, J, y otros. «Experimental investigation of the 200 keV X-ray dose response of the high temperature thermoluminescence in LiF: Mg, Ti (TLD-100): theoretical interpretation using the unified interaction model.» *Radiat. Prot. Dosimetry* 138 (2010): 320-333.
- Marre, D, y otros. «Energy correction factors of LiF powder TLDs irradiated in high-energy electron beams and applied to mailed dosimetry for quality assurance networks.» *Phys. Med. Biol.* 45 (2000): 3657-3674.
- Masillon-JL, G, I Gamboa-deBuen, y M E Brandan. «Onset of supralinear response in TLD-100 exposed to ^{60}Co gamma-rays.» *Journal of physics D: Applied physics* 39 (2006): 262-268.
- Massillon-JL, G, I Gamboa-deBuen, y ME Brandan. «Observation of enhanced efficiency in the excitation of ion-induced LiF:Mg,Ti thermoluminescent peaks.» *J. Appl. Phys.* 100 (2006): 103521.
- McKeever, Stephen W.S., Marko Moscovitch, y Peter D. Townsend. *Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses*. England: Nuclear Technology Publishing, 1995.
- Mercado-Uribe, H, y M E Brandan. «Thermoluminescent response of TLD-100 irradiated with 20 keV electrons and the use of radiochromic dye films for the fluence determination.» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 222 (2004): 201-212.
- Mobit, Paul N, Alan E Nahum, y Philip Mayles. «The energy correction factor of LiF thermoluminescent dosimeters in megavoltage electron beams: Monte Carlo simulations and experiments.» *Phys. Med. Biol.* 42 (1996): 979-993.
- Mosia, G J, y A.C. Chamberlain. «Evaluation and comparison of absorbed dose for electron beams by LiF and diamond dosimeters.» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 580 (2007): 570-573.
- Nahajowski, D, y otros. «Evaluation of the relative effectiveness of LiF-based TL detectors for electron radiotherapy beams over the energy range 6-20 MeV.» *Radiation Measurements* 43 (2008): 879-882.
- Nunes, M.G., y L.L. Campos. «Study of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ and LiF:Mg, Ti detectors TL response to electron radiation using a SW Solid Water phantom.» *Radiation Measurements* 43 (2008): 459-462.
- Podgorsak, E B. *Radiation physics for medical physicists*. Springer, 2006.
- Podgorsak, E.B. *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.

- Puchalska, M, P Bilski, y P Olko. «Thermoluminescence glowpeak parameters for LiF:Mg, Ti with modified activator concentration.» *Radiation Measurements* 42 (2007): 601-604.
- Puchalska, M, y P Bilski. «GlowFit a new tool for thermoluminescence glow-curve deconvolution.» *Radiation Measurements* 41 (2006): 659-664.
- Puchalska, M., y P. Bilski. «The thermoluminescence glow-curve analysis using GlowFit- the new powerful tool for deconvolution.» *Polish Academy of Sciences*, 2005.
- Robar, Vlado, Corey Zankowski, Marina Olivares Pla, y Ervin B Podgorsak. «Thermoluminescent dosimetry in electrons beams: Energy dependence.» *Medical Physics* 23 (1996): 667-673.
- Rojas, Leticia. «El método Monte Carlo en dosimetría y otras aplicaciones.» *Contacto Nuclear*, nº 39 (2005).
- Salvat, Francesc, José M Fernández-Varea, y Josep Sempau. «PENELOPE-2011: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport.» *Nuclear Energy Agency*, 2011.
- Shiragai, Akihiro. «An approach to an analysis of the energy response of LiF-TLD to high energy electrons.» *Phys. Med. Biol.* 22, nº 3 (1997): 490-499.