



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"RESPUESTA TERMOLUMINISCENTE DE DOSÍMETROS TLD-100 SUJETOS A DISTINTOS PROTOCOLOS DE HORNEADO, IRRADIACIÓN Y LECTURA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C O

P R E S E N T A :

DAVID ESTRADA ESPINOSA

DIRECTOR DE TESIS ~~DAVID~~ OLGA LETICIA ÁVILA AGUIRRE



MÉXICO, D.F. FACULTAD DE CIENCIAS SECCIÓN ESCOLAR

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



... a la Dirección General de Bibliotecas •
UNAH y difundir en formato electrónico e impr...
contenido de mi trabajo receptor.

NOMBRE: David Estrada Espinosa

FECHA: 25/November/02

TITULO: Dosimetría termoluminiscente

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito: Respuesta termoluminiscente de dosímetros TLD-100 sujetos a distintos protocolos de horneado, irradiación y lectura.

realizado por David Estrada Espinosa

con número de cuenta 555117-1, quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

- Director de Tesis Propietario Dra. Olga Leticia Avila Aguirre *[Signature]*
- Propietario M. en C. Ana Elena Buenfià Burgos *[Signature]*
- Propietario Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga *[Signature]*
- Suplente M. en C. Patricia Raquel Aviles Mandujano *[Signature]*
- Suplente M. en C. Adolfo Zarate Morales *[Signature]*

Consejo Departamental de Física

[Signature]
DRA. PATRICIA GONZALEZ MORALES
INSTRUMENTO DE FÍSICA

*A mi querido pueblo, y
gobierno de México*

Agradecimientos

- *A la Dra. Olga Ávila por la dirección de este trabajo*
- *A mi estimada Dra. Ma. Ester Brandán por su apoyo, asesoría y revisión de este trabajo*
- *A mi maestra Ana Elena Buenfil por la revisión de este trabajo, y además por su paciencia, estimación y amistad*
- *A mi buen amigo M. en C. Cesar Ruiz por sus regaños y consejos*
- *A mi comité de sinodales por la esmerada revisión de este trabajo:*

*Dra. Bety Fuentes,
M. en C. Paty Avilés, y
M. en C. Adolfo Zarate.*

- *A las lindísimas mujeres del departamento de Física y de servicios escolares de la Facultad de Ciencias por su gran ayuda y amabilidad en los tramites de este trabajo*
- *y en especial a mi Universidad Nacional Autónoma de México, que como institución le debo gran parte de lo que soy ahora...*

a todas ellas y ellos

¡Muchas Gracias!

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| ÍNDICE..... | 1 |
| RESUMEN..... | 3 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 2 TERMOLUMINISCENCIA Y SUS PROPIEDADES..... | 11 |
| 2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS..... | 11 |
| 2.2 TERMOLUMINISCENCIA..... | 12 |
| 2.3 TERMOLUMINISCENCIA DEL LiF:Mg,Ti (TLD-100)..... | 15 |
| 2.4 SUPRALINEALIDAD..... | 16 |
| 2.5 EFICIENCIA RELATIVA TERMOLUMINISCENTE..... | 17 |
| 2.6 DOSIMETRÍA..... | 18 |
| 3 TÉCNICAS EXPERIMENTALES..... | 21 |
| 3.1 DOSÍMETROS TL..... | 21 |
| 3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS..... | 22 |
| 3.3 IRRADIACIÓN GAMMA..... | 23 |
| 3.3.1 FUENTE DE RADIACIÓN..... | 23 |
| 3.3.2 DISPOSITIVO DE IRRADIACIÓN..... | 25 |
| 3.3.3 IRRADIACIÓN..... | 25 |
| 3.4 IRRADIACIÓN CON PROTONES..... | 26 |
| 3.4.1 FUENTE DE RADIACIÓN..... | 26 |
| 3.4.2 DISPOSITIVO DE IRRADIACIÓN..... | 27 |
| 3.4.3 IRRADIACIÓN..... | 30 |
| 3.5 LECTURA..... | 32 |
| 3.6 PROTOCOLOS..... | 33 |
| 3.7 CURVA DE BRILLO..... | 34 |
| 4 RESULTADOS..... | 43 |
| 4.1 SEÑAL TERMOLUMINISCENTE..... | 43 |
| 4.2 EFICIENCIA RELATIVA TERMOLUMINISCENTE PARA PROTONES CON RESPECTO A GAMMAS DE ⁶⁰ Co..... | 50 |

| | |
|--|----|
| 5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS..... | 61 |
| 5.1 DISTRIBUCIÓN DE LA SEÑAL TL EN LA CURVA DE BRILLO..... | 61 |
| 5.2 EFICIENCIA EN EL EQUIPO LECTOR UNAM..... | 64 |
| 5.3 EFICIENCIA EN EL EQUIPO LECTOR ININ..... | 67 |
| 5.4 EFICIENCIA (CONSIDERACIONES FINALES)..... | 69 |
| 6 CONCLUSIONES..... | 73 |
| APÉNDICE A..... | 75 |
| INCERTIDUMBRE DE LA FLUENCIA..... | 75 |
| INCERTIDUMBRE DEL RADIO R_{TLD} Y EL ANGULO θ_{TLD} | 76 |
| APÉNDICE B..... | 77 |
| PÉRDIDA DE ENERGÍA DEL HAZ DE PROTONES EN EL BLANCO..... | 77 |
| APÉNDICE C..... | 79 |
| EFICIENCIA EQUIPO LECTOR UNAM..... | 79 |
| EFICIENCIA EQUIPO LECTOR ININ..... | 81 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 85 |

RESUMEN

El interés que motivó la realización de este trabajo es la discrepancia encontrada entre los valores de la eficiencia termoluminiscente de partículas cargadas pesadas (PCP) respecto de radiación gamma ($\eta_{PCP,\gamma}$), reportados en diferentes trabajos y recopilados recientemente por Horowitz (Ho 01).

Las medidas de eficiencia termoluminiscente relativa tienen importancia en relación a la dosimetría asociada a terapia médica con partícula cargada pesada.

La medición de $\eta_{PCP,\gamma}$ depende de múltiples factores experimentales. Para comprender esta dependencia se cuantificó el efecto de usar diferentes procedimientos experimentales en la estimación de la eficiencia relativa termoluminiscente de dosímetros TLD-100 (LiF:Ti;Mg) para protones de 3 MeV respecto de rayos gamma de ^{60}Co ($\eta_{P,\gamma}$), variando el lote, la presentación, el horneado y el equipo lector. Cuando se utilizó el mismo procedimiento global se obtuvieron valores para $\eta_{P,\gamma}$ dentro del intervalo [0.30, 0.58] para el pico 5 y [0.35, 0.76] para la señal total termoluminiscente (TL). Al usar diferente equipo, horneado y lote se obtienen diferencias máximas de 30%, 12% y 6% respectivamente en los valores de $\eta_{P,\gamma}$ para el pico 5, y 25%, 28% y 7% para la señal total TL. Los cambios más significativos de 36% y 44% para pico 5 y señal total respectivamente se obtienen al cambiar la presentación del dosímetro.

Como una investigación complementaria se estudió la distribución de la señal TL de cada pico en la deconvolución de la curva de brillo con respecto a la señal total en dosímetros expuestos a alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²) variando el protocolo experimental. Se encontró que la distribución de la señal TL tiene una diferencia del orden de 5% al cambiar el equipo de lectura utilizado. Se observó que la contribución del pico 5 respecto de la señal total se preserva al cambiar horneado y que resulta ser

8% mayor para la presentación en dosímetros de $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ que para dosímetros de $0.89 \times 3.17 \times 3.17 \text{ mm}^3$ de TLD-100.

Dada la importancia de contar con valores de eficiencia relativa termoluminiscente confiable en aplicaciones asociadas a dosimetría médica, la conclusión principal de este trabajo es la recomendación de medir eficiencias relativas siguiendo un protocolo de trabajo cuidadoso y previamente definido tanto para la radiación de partícula cargada como para la radiación gamma y controlando todos los factores experimentales involucrados.

1 INTRODUCCIÓN

La emisión de luz de ciertos materiales al ser calentados ha causado un gran interés al ser humano a lo largo de la historia. Este proceso conocido hoy en día como termoluminiscencia abarca muchas áreas de investigación y aplicación como son la medicina, la arqueología, la geología, la física del estado sólido, etc. La termoluminiscencia es una de las más fructíferas áreas de la dosimetría de la radiación y la importancia de esta área radica en el hecho de que la cantidad de luz emitida por el material, previamente irradiado, es proporcional a la dosis absorbida.

El uso de la termoluminiscencia en el área de la dosimetría de la radiación implica un profundo estudio de los materiales termoluminiscentes, su preparación, irradiación y lectura, además del conocimiento de los efectos del medio ambiente sobre el proceso termoluminiscente (TL).

El mecanismo general para explicar el fenómeno TL es el siguiente: al irradiar el cristal, su estructura sufre alteraciones por ionización; en este proceso se liberan electrones de la red y se generan dos entes móviles: electrones y agujeros, ambos portadores de carga que pueden viajar por el cristal hasta quedar atrapados en defectos o impurezas de la red que constituyen estados metaestables dentro de la banda prohibida del material y que funcionan como trampas para electrones y agujeros.

Los portadores de carga permanecen atrapados hasta que se le proporciona al material la energía térmica suficiente para liberarlos, entonces viajan nuevamente por el cristal y pueden encontrar una trampa con un portador de signo opuesto recombinándose y emitiendo fotones de luz visible. En este caso la trampa funciona como un centro

luminiscente. A la energía necesaria para liberar a los entes atrapados se le llama energía de activación o profundidad de la trampa. Los fotones emitidos por el material forman una curva característica llamada curva de brillo que es una firma que identifica el material.

La termoluminiscencia se puede dividir de manera simple en dos subprocesos, el primero en que la energía es absorbida por el material al ser irradiado y el segundo en el cual se emite la luz al ser calentado.

La eficiencia termoluminiscente α se define como (Ka82, Ho84):

$$\alpha = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

donde ε es la energía promedio impartida por el campo de radiación y ε_0 es la energía promedio emitida como luz al ser calentado (Señal Termoluminiscente STL).

Dada la complejidad del fenómeno termoluminiscente en el que se presentan diversos mecanismos intermedios antes de la emisión de luz, los científicos se han concentrado en estudiar una cantidad relativa, llamada eficiencia relativa termoluminiscente $\eta_{k,\gamma}$ definida como:

$$\eta_{k,\gamma} = \frac{\left(\frac{(STL)}{D} \right)_k}{m_k} \bigg/ \frac{\left(\frac{(STL)}{D} \right)_\gamma}{m_\gamma} \quad (1.2)$$

donde $(STL/D)_k$ es la señal termoluminiscente (STL) por unidad de dosis (D) por unidad de masa irradiada (m_k) para la radiación de interés k , y $(STL/D)_\gamma$ la señal termoluminiscente por unidad de dosis por unidad masa irradiada (m_γ) para radiación gamma de ^{60}Co .

Generalmente la respuesta de un material termoluminiscente presenta una respuesta lineal a dosis bajas, seguida de una respuesta supralineal (mayor que lineal) y una zona de saturación (sublineal). La medida de eficiencias TL debe realizarse a dosis bajas donde la respuesta es lineal. Esto es importante ya que los valores de la eficiencia relativa termoluminiscente $\eta_{k,\gamma}$ son utilizados en aplicaciones médicas, industriales y de

investigación para determinar la dosis recibida por el dosímetro termoluminiscente (TLD) ante exposiciones a distintos campos de radiación.

Los valores de las mediciones realizadas de la eficiencia relativa termoluminiscente $\eta_{k,\gamma}$ reportados en la literatura por diversos autores, muestran discrepancias notables para un mismo tipo de radiación; ver figura 1.1 (datos recopilados por Horowitz (Ho01, Ho84)). Esta figura muestra la eficiencia relativa termoluminiscente para partículas cargadas pesadas (PCP) con respecto a radiación gamma en función de la transferencia lineal de energía (LET en inglés) expresada como $dE/d\xi$, con $\xi = \rho x$, siendo ρ la densidad del LiF. La transferencia lineal de energía (LET) se define como la tasa lineal promedio de depósito de energía en un medio irradiado con partículas cargadas.

El concepto de LET es fundamental en la física de radiaciones, radiobiología y dosimetría ya que el efecto de la radiación sobre el sistema depende tanto de la dosis como del LET.

En la gráfica 1.1 se puede observar que los valores de $\eta_{k,\gamma}$ disminuyen al incrementar el LET y son diferentes para partículas del mismo LET.

Se sabe (Ho84, Ho01) que variaciones en los distintos aspectos experimentales de la medición, como son los tratamientos térmicos, el equipo lector utilizado, la concentración de impurezas (lote), etc., producen diferencias en los valores obtenidos de $\eta_{k,\gamma}$. En esta tesis se investiga el efecto de variar distintos aspectos experimentales en el protocolo de medición de la eficiencia relativa termoluminiscente $\eta_{k,\gamma}$. También se investiga el efecto de estas variaciones en la distribución de la señal TL de los picos de las curvas de brillo medidas a alta fluencia de protones.

A continuación se describe la organización de los capítulos de esta tesis.

En el capítulo 2 se presenta el fenómeno termoluminiscente comenzando por sus antecedentes históricos. Después se describe el proceso termoluminiscente de manera general así como la termoluminiscencia del LiF:Mg;Ti, recalcando la importancia de éste como material dosimétrico. Se define la eficiencia relativa termoluminiscente y por último se presentan los elementos básicos de dosimetría de la radiación.

En el capítulo 3 se describen en detalle las técnicas experimentales y los cuatro protocolos de trabajo utilizados en la medición de la eficiencia relativa termoluminiscente $\eta_{P,\gamma}$ de protones de 3 MeV, con respecto a gammas de ^{60}Co , así como el procedimiento utilizado

en el análisis de la curva de brillo y su descomposición en sus picos componentes (deconvolución).

En el capítulo 4 se presentan los valores obtenidos de la señal TL para cada pico de la curva de brillo y la señal total, y se determinan los valores de $\eta_{P,\gamma}$ para cada protocolo de trabajo y la combinación de éstos (se determina el denominador de ecuación (1.2) con un protocolo distinto al usado para obtener el numerador).

En el capítulo 5 se estudia la distribución de la señal TL de los picos de la curva de brillo respecto de la señal total, para cada protocolo de trabajo de los dosímetros expuestos a alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²). Se analizan los resultados obtenidos para $\eta_{P,\gamma}$ estudiando el efecto de cada variación experimental.

Al finalizar se presentan las conclusiones del trabajo y sus posibles implicaciones con respecto a la forma más adecuada de medir la eficiencia relativa termoluminiscente $\eta_{k,\gamma}$.

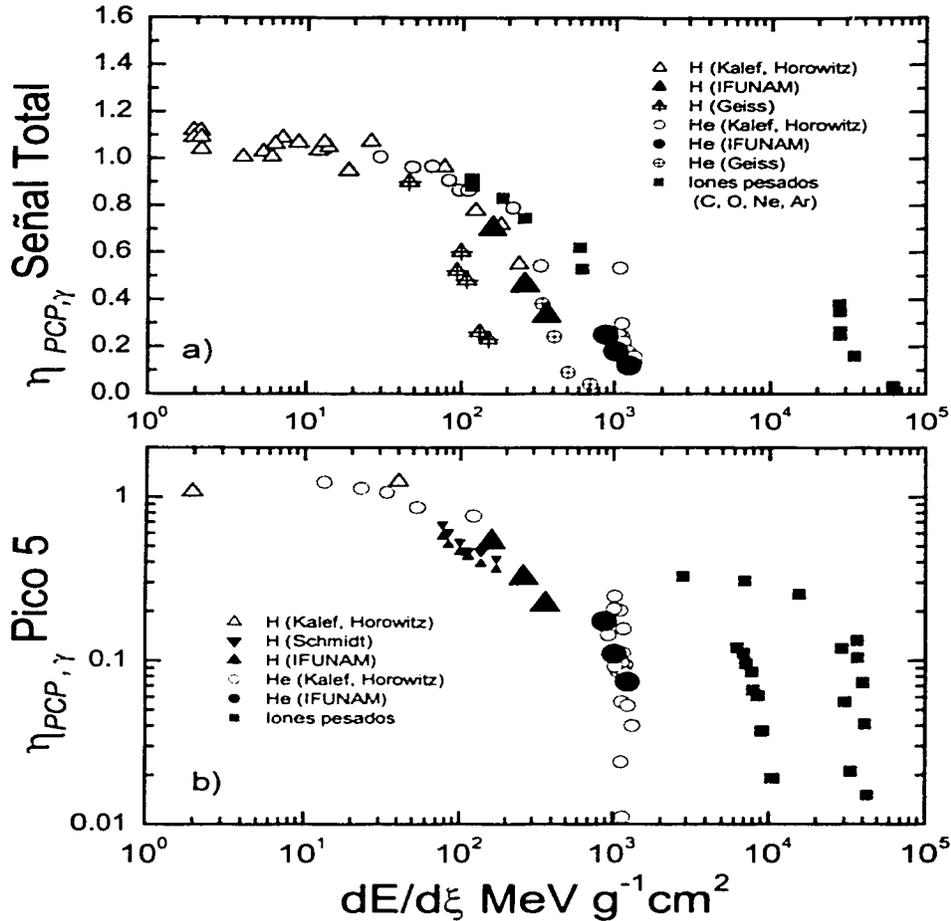


Figura 1.1. Eficiencia relativa termoluminiscente η para partículas cargadas pesadas (PCP), respecto de radiación gamma de ^{60}Co (Ho 01), protones (triángulos), He (círculos) y otros iones pesados (cuadrados). Los triángulos con cruz son medidas realizadas por Geiss y sus colaboradores (Ge98). Los triángulos pequeños son medidas de Schmidt et al (Sc90). Por último los símbolos sólidos grandes (triángulos y círculos) son medidas realizadas en el IFUNAM (Av98a, Ga96c, Ga98, Ro00).

2 TERMOLUMINISCENCIA Y SUS PROPIEDADES

En este capítulo se presentan antecedentes históricos de la termoluminiscencia, se describe el proceso termoluminiscente, se resalta la importancia de los dosímetros termoluminiscentes de la familia del LiF:Mg,Ti como material dosimétrico, se define la eficiencia relativa termoluminiscente y por último, se presentan los elementos básicos de dosimetría de la radiación.

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Desde la época prehistórica el ser humano observó a su alrededor el fenómeno luminiscente. El brillo que emitían algunos insectos, plantas, hongos y piedras fue probablemente el primer fenómeno luminiscente que contempló el ser humano.

Los primeros avances se dieron a principios del siglo XVIII. Sir Robert Boyle (fundador de la química moderna) reportó a la Sociedad Real Londinense un tipo de luminiscencia a la que se llamó "Termoluminiscencia" (TL) que se daba cuando él calentaba un diamante en la oscuridad de su dormitorio.

En 1705 Oldenberg describió la termoluminiscencia de la fluorita, y posteriormente Henri Becquerel también investigó sobre ella en su trabajo de la medición del espectro infrarrojo en 1883. Al finalizar el siglo XIX Wiedemann y Schmidt utilizaron la termoluminiscencia para la detección de la radiación ionizante, naciendo así la dosimetría termoluminiscente de la radiación ionizante. Marie Curie observó y notó la termoluminiscencia que presentaba la fluorita de calcio expuesta a radio reportándolo en su tesis doctoral.

En 1930, Urbach y Frish en Viena, describieron el proceso TL en los halogenuros alcalinos. Entre 1940 y principios de 1950, Daniels y sus estudiantes de la Universidad de Wisconsin en Estados Unidos, comenzaron los estudios del fluoruro de litio (LiF) desarrollando bolitas presurizadas de este material fabricadas por la empresa de

Harshaw Chemical en Cleveland, Ohio, como dosímetros experimentales. Más adelante fueron abandonados en favor de otros materiales basados en óxido de aluminio (Al_3O_3) debido a la inestabilidad que presentaban los picos de bajas temperaturas. Estos estudios fueron continuados por John R. Cameron de la misma Universidad quien incorporó impurezas de Mg en el LiF, resultando el material con las propiedades dosimétricas deseables como son: número atómico equivalente al del tejido vivo, un intervalo amplio de linealidad en la respuesta TL con respecto a la dosis, poca sensibilidad a luz visible, etc. En 1963 la empresa Harshaw patentó y fabricó dosímetros con este material LiF:Mg:Ti llamándolo TLD-100 (Be73).

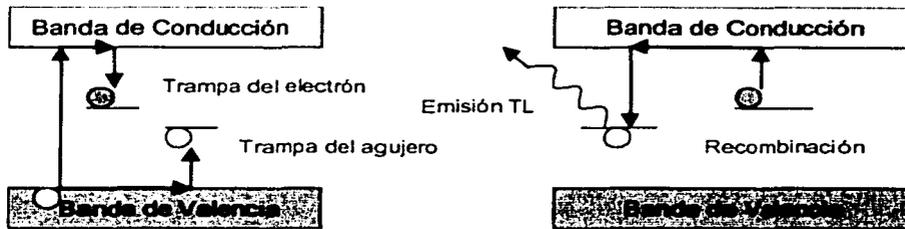
Hoy en día, científicos de todo el mundo se dedican a la investigación y aplicación de la dosimetría termoluminiscente.

2.2 TERMOLUMINISCENCIA

En la actualidad no existe una teoría que explique completamente el fenómeno TL. Sin embargo, varios modelos tratan de explicarlo a partir de la existencia de tres elementos principales: los centros de recombinación, los entes móviles o portadores de carga y las trampas. Además, se usa la teoría de bandas de un sólido para los estados electrónicos de energía. Considerando esto describiremos el proceso TL que se esquematiza en la figura 2.1.

Al interaccionar la radiación ionizante con un cristal, le proporciona energía para generar entes móviles; es decir, electrones y agujeros. Los electrones son transferidos de la banda de valencia a la de conducción, dejando agujeros en la banda de valencia; entonces los portadores de carga (electrones y agujeros) viajan por el cristal hasta que son atrapados en estados de energía que tienen una vida media relativamente grande (estados metaestables). Los estados metaestables son causados por defectos o impurezas dentro de la red cristalina del material, se encuentran en la banda prohibida y funcionan como una trampa. Posteriormente, durante el calentamiento del sólido irradiado, los electrones y los agujeros son liberados de sus trampas y pueden viajar por el cristal, emigrando de nuevo los electrones a la banda de conducción hasta caer en una trampa para agujeros que puede actuar como, o estar asociada a, un centro luminiscente; si este es el caso se recombinan emitiendo luz. Ocurre un proceso similar cuando se liberan agujeros. También hay que considerar que una vez liberado el

electrón o agujero de su trampa, estos pueden caer en otra, haciendo el proceso termoluminiscente más complicado. Existen además, otros centros de recombinación en el sólido, de naturaleza diferente, que compiten con los centros luminiscentes.



Exposición a la radiación

Al calentar el cristal, se liberan los electrones de sus trampas regresando a la banda de conducción y recombinándose con un centro luminiscente, emitiendo un fotón TL.

Figura 2.1 Proceso termoluminiscente.

Para observar el proceso TL se calienta el material, es decir se le proporciona la energía necesaria para liberar los electrones y agujeros. Éstos se recombinan con las trampas de diferente profundidad en energía causando la emisión de fotones que dan lugar a una curva de brillo que es característica del material y puede presentar uno o varios picos, ver figura 2.2.

En 1945, Randall y Wilkins (Ra45) proponen una interpretación teórica para explicar la liberación térmica de los electrones de las trampas. Esta supone la existencia de una sola trampa con profundidad E por debajo de la banda de conducción y considera que una vez que el electrón es liberado no puede caer nuevamente en ella. A ésta se le conoce como cinética de primer orden. Considerando que los electrones atrapados tienen una distribución Maxwelliana de energía, la tasa de liberación de los electrones está dada por:

$$\frac{dn}{dt} = -n s \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (2.1)$$

donde n es el número de electrones atrapados, s es el factor de frecuencia de vibración del electrón en la trampa, k es la constante de Boltzman y T es la temperatura absoluta del material en el instante t .

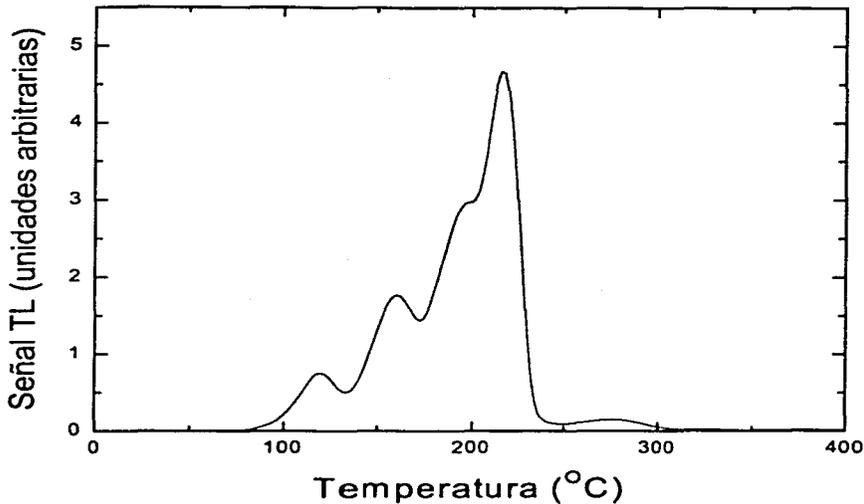


Fig 2.2 Curva de brillo característica de TLD-100 irradiada con gammas de ^{60}Co .

Si suponemos una rapidez de calentamiento constante:

$$\beta = \frac{dT}{dt}$$

entonces

$$-\frac{dn}{dT} = -\beta \frac{dn}{dt} = n s \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (2.2)$$

De las ecuaciones (2.1) y (2.2), se tiene que el número de electrones atrapados en un instante t a una temperatura T está dado por la ecuación (2.3)

$$n = n_0 s \exp\left[-\int_{T_0}^T \frac{s}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{kT'}\right) dT'\right] \quad (2.3)$$

donde T_0 es la temperatura inicial de calentamiento y n_0 es el número de electrones atrapados inicialmente.

Si el tiempo que permanece el electrón en la banda de conducción es muy corto, la intensidad luminosa es proporcional a la velocidad de liberación de los electrones de sus trampas. Por lo tanto sustituyendo la ecuación (2.3) en (2.1) se obtiene la ecuación (2.4) para un pico de brillo.

$$I = -\frac{dn}{dT} = n_0 s \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \exp\left[\frac{-s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E}{kT'}\right) dT'\right] \quad (2.4)$$

Analizando la ecuación (2.2) podemos observar que cuando se incrementa la temperatura de manera lineal en función del tiempo, desde la temperatura ambiente, aumenta la rapidez de liberación de los electrones, hasta una temperatura máxima T_m después de la cual la rapidez de liberación de los electrones cae abruptamente. Derivando la ecuación (2.2) con respecto a la temperatura e igualando a cero se obtiene la posición de máxima intensidad TL, es decir, el valor de T_m dado por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{E}{kT_m^2}\right) = \frac{ns}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{kT_m}\right) \quad (2.5)$$

Al observar detenidamente la ecuación anterior se deduce que al incrementar la rapidez de calentamiento β la posición de la máxima intensidad T_m de los picos de brillo se desplaza a mayores temperaturas.

2.3 TERMOLUMINISCENCIA DEL LiF;Mg:Ti (TLD-100)

Existen muchos materiales termoluminiscentes orgánicos e inorgánicos. El fluoruro de litio es un material inorgánico que tiene las siguientes características termoluminiscentes: un intervalo amplio de linealidad en su respuesta a la dosis, poca sensibilidad a la luz visible, estabilidad, reusabilidad y regularidad en la reproducibilidad de las lecturas. Estas propiedades dosimétricas, además de su número atómico ($Z_{ef} = 8.2$) similar al del tejido humano ($Z_{ef} = 7.4$), hacen de este material una joya entre los materiales termoluminiscentes, lo que ha propiciado que sea el material TL más estudiado en el mundo y utilizado en diversas aplicaciones médicas, de radiodiagnóstico y radioterapia.

La empresa Harshaw Bicron de E.U.A., ha comercializado dosímetros de LiF:Mg:Ti como son : el TLD-100 (7% ^6Li y 92.5% ^7Li), el TLD-600 (~92.5% ^6Li y 4.8% ^7Li) y el TLD-700 (0.007% ^6Li y 99.995 ^7Li); éstos contienen 300 ppm de impurezas de Mg y 15 ppm de Ti.

Estudios recientes revelan que las impurezas del Mg^{2+} (Ho84) están relacionadas con las trampas del material, y las impurezas de Ti con los centros luminiscentes (Ma85).

2.4 SUPRALINEALIDAD

La relación que existe entre la señal termoluminiscente (STL) y la dosis para un material termoluminiscente es lineal dentro de un cierto intervalo. Por ejemplo para los dosímetros de LiF:Mg;Ti (TLD-100) irradiados con rayos X y gammas, la STL es lineal hasta unos cuantos Gy. Mas allá del intervalo de linealidad, se presenta supralinealidad y sublinealidad, ver figura 2.3.

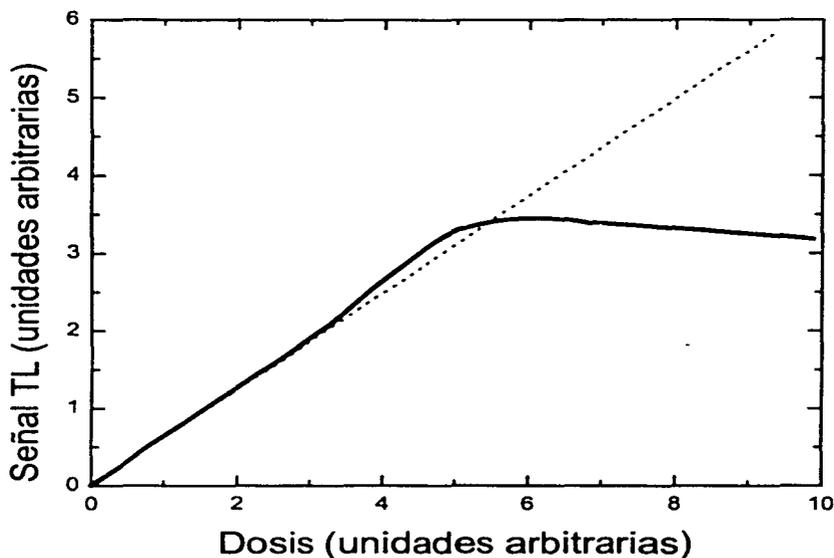


Figura 2.3 La gráfica muestra que la señal TL con respecto a la dosis tiene un comportamiento lineal para bajas dosis, presentándose después la supralinealidad y la sublinealidad.

La supralinealidad puede entenderse con base en la llamada "función de dosis respuesta" $f(D)$, definida por:

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_0)/D_0} \quad (2.6)$$

donde $F(D)$ es la STL obtenida a una dosis D y $F(D_0)$ es la STL obtenida a una dosis baja D_0 , donde el comportamiento de STL es lineal.

Esta función mide el grado de la desviación de la linealidad en la STL como función de la dosis.

Si

$f(D) = 1$ se tiene linealidad

$f(D) > 1$ se tiene una respuesta supralineal, es decir mayor que lineal

$f(D) < 1$ se tiene una respuesta sublineal, es decir menor que lineal

El Modelo de Interacción de Trazas (MIT) fue propuesto por Claffy [Cl 68] y Attix [At 75] para explicar el comportamiento supralineal y posteriormente fue modificado por Horowitz [Mo 86, Ho90, Ho96]. El MIT revela que la supralinealidad es un fenómeno que se produce durante el calentamiento de los dosímetros, proceso durante el cual los portadores de carga (electrones) que se producen en la irradiación y fueron atrapados dentro del radio de la traza padre pueden emigrar y recombinarse con centro luminiscentes activados en una traza vecina.

El grado de supralinealidad del TLD-100 se incrementa con el aumento de energía de los fotones (Mc95). Por otra parte, el comportamiento sublineal es debido a los efectos de saturación y daño producido por la radiación.

2.5 EFICIENCIA RELATIVA TERMOLUMINISCENTE

El valor de la eficiencia relativa termoluminiscente definida por la ecuación (1.2) en el capítulo 1, nos indica cuánta luz emite el material al ser expuesto a una cierta radiación de interés k con respecto a la que emite al ser expuesto a una radiación de referencia que usualmente es radiación gamma de ^{60}Co .

$$\eta_{k,r} = \frac{\left(\frac{STL}{D} \right)_k}{m_k} \bigg/ \frac{\left(\frac{STL}{D} \right)_r}{m_r} \quad (1.2)$$

La medición de la señal termoluminiscente (STL) depende de las condiciones experimentales que van desde las características del equipo lector y el material del

dosímetro, hasta el proceso involucrado en la preparación, irradiación y lectura del mismo.

Es importante señalar que la medición de la eficiencia se debe hacer en la región que la STL tenga una relación lineal con la dosis por lo que se explicó en la sección anterior.

2.6 DOSIMETRÍA

Para poder hablar de dosimetría termoluminiscente hay que definir algunos conceptos importantes de esta área.

La dosimetría es la medición de la dosis absorbida por un material orgánico o inorgánico debida a la radiación ionizante. La dosis absorbida D es el valor esperado de la energía impartida ϵ a la materia por unidad de masa m en un intervalo de tiempo. Si la masa es reducida a una cantidad infinitesimal entonces la dosis está definida como (At86) :

$$D = \frac{d\epsilon}{dm} \quad (2.7)$$

Hay que observar que ésta es una cantidad puntual para cualquier posición en el material. La unidad de la dosis es el Gray o Gy (1 Gy = 1 joule/kg) o bien el rad (1 rad = 1×10^{-2} Gy).

La tasa de dosis absorbida en un punto P en un intervalo de tiempo dt está dada por

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\epsilon}{dm} \right) \quad (2.8)$$

Otra cantidad importante es la afluencia ϕ , que es el valor esperado del número de partículas N_e que atraviesa una esfera de radio r con centro en un punto dado P sobre el volumen del material en un intervalo de tiempo. Si la esfera es reducida a un punto infinitesimal de área da , entonces la afluencia está dada por

$$\phi = \frac{dN_e}{da} \quad (2.9)$$

Las unidades son m^{-2} o cm^{-2} .

Por último es necesario que exista equilibrio de partícula cargada para calcular de manera sencilla la dosis absorbida por un material irradiado.

Si consideramos un material de masa m contenido en un volumen v , el cuál es irradiado con un haz de radiación uniforme, la radiación secundaria generada estará formada por partículas cargadas donde algunas salen de v . Esto complica la situación ya que parte de la energía incidente se la llevan estas partículas salientes y por lo tanto se dificulta calcular la energía impartida. Para solucionar este problema, se rodea el volumen v con otro medio, de tal manera que la distancia entre los bordes del volumen v y el volumen V estén separados por una distancia menor al alcance máximo de las partículas secundarias, ver figura 2.4.

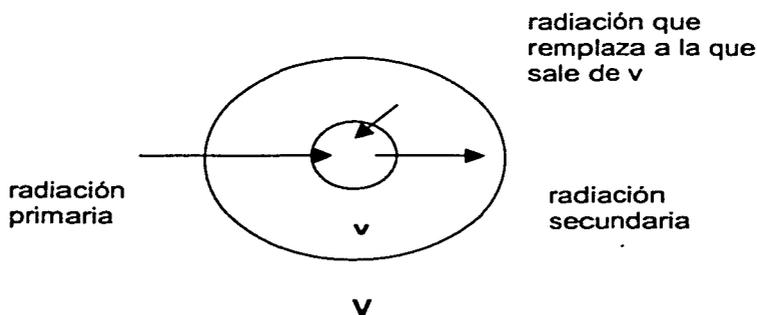


Figura 2.4 El diagrama muestra la manera de obtener el equilibrio de partícula cargada.

El objetivo de rodear el volumen v con otro medio, es que las partículas producidas por la radiación primaria en V reemplacen a las partículas secundarias que salen de v , con la condición de que las primeras sean del mismo tipo y energía que las segundas.

Si se garantiza que la composición atómica y la densidad del medio sea homogénea, no existan campos magnéticos o eléctricos inhomogéneos, y se tenga un campo de radiación indirectamente ionizante (es decir, los rayos deben sufrir una atenuación despreciable al pasar a través del medio), entonces se tiene equilibrio de partícula cargada en V .

Es posible que exista equilibrio de partícula cargada en un cierto volumen aun sin que se garanticen las condiciones anteriores, pero bajo ciertas condiciones geométricas. Por ejemplo, en el caso de que el volumen v sea lo suficientemente grande para que la radiación secundaria no salga de él, por lo que obviamente no se necesita que sean reemplazadas.

3 TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El objetivo de presentar las técnicas experimentales en este capítulo es para comprender y evaluar el efecto de variar los factores experimentales en los valores medidos de la eficiencia relativa termoluminiscente η .

Los factores experimentales a variar son:

- presentación de los dosímetros TLD-100
- lote de dosímetros TLD-100
- tratamiento térmico
- equipo lector

Para cada presentación y lote se establecieron cuatro protocolos distintos de trabajo que se describirán más adelante en este capítulo.

Al final de este capítulo se describe el procedimiento utilizado en el análisis de la curva de brillo y la descomposición en sus picos componentes (deconvolución).

3.1 DOSÍMETROS TL

Un dosímetro se considera absoluto si se puede construir y usar en forma subsecuente para medir la energía absorbida sin necesidad de calibrarlo en un campo de radiación conocido. Entre éstos se encuentran los calorímetros y las sustancias químicas. Los dosímetros termoluminiscentes (TL) no son dosímetros absolutos, son dosímetros secundarios que necesitan ser calibrados para medir la energía absorbida.

En este trabajo se usaron dosímetros conocidos comercialmente como TLD-100 que están compuestos de polvo presurizado de LiF:Mg,Ti , fabricados por la compañía Harshaw, en dos presentaciones que llamaremos galletas y microcubos que tienen distintas dimensiones (ver tabla 3.1).

| PRESENTACIÓN | DIMENSIONES(mm³) |
|---------------------|------------------------------------|
| Galleta | 3.17x3.17x0.89 |
| Microcubo | 1x1x1 |

Tabla 3.1 Presentaciones del TLD-100 (LiF:Mg,Ti)

Los dosímetros TL son fabricados en placas grandes que después son cortadas. Al hacer referencia a un lote significa que los dosímetros en cuestión pertenecen a la misma placa y por lo tanto se fabricaron simultáneamente teniendo una misma concentración de impurezas. En el caso de galletas se emplearon dos lotes que identificamos por la fecha de adquisición en el laboratorio de dosimetría del IFUNAM (tabla 3.2).

| GALLETA | FECHA |
|----------------|-----------------|
| Lote 1 | 27/junio/2000 |
| Lote 2 | 02/octubre/2000 |

Tabla 3.2 Lotes de galletas utilizados en este trabajo

3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

La experiencia en el uso de materiales TL indica que los dosímetros deben ser sometidos a tratamientos térmicos antes de ser usados (Ho90). Esto permite que las impurezas regresen a su configuración inicial y que se borre la señal acumulada debida al almacenamiento.

Algunos estudios revelan que la atmósfera del horneado tiene una gran importancia en la respuesta de los dosímetros (Ka80, Ca94), pero un estudio realizado en el IFUNAM por la Dra. Gamboa de Buen (Ga96a) revela que no existe algún efecto notable entre utilizar una atmósfera de He o de aire.

Los dosímetros utilizados fueron sometidos a dos tipos de horneado a los que denominamos simple y completo, y se describen en la tabla 3.3. Ambos tipos de horneado fueron realizados en una atmósfera de aire.

| TIPOS DE HORNEADO | |
|--|--|
| SIMPLE | COMPLETO |
| 1) Una hora a 400° C | 1) Una hora a 400° C |
| 2) Enfriado abrupto inmediato por 5 minutos a temperatura ambiente | 2) Enfriado abrupto inmediato por 5 minutos a temperatura ambiente |
| | 3) Horneado por dos horas a 100° C |
| | 4)) Enfriado abrupto inmediato por 5 minutos a temperatura ambiente |

Tabla 3.3 Se describen los dos tipos de horneado al que se sometieron los dosímetros

El horneado simple se realizó en una mufla, marca Thermolyne del laboratorio de dosimetría del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares ININ y para el horneado completo se emplearon los hornos del laboratorio de dosimetría de la radiación del Instituto de Física IFUNAM, donde el horneado a 400° C se realizó en un horno programable, marca Thermolyne, modelo 47900 y el horneado a 100° C en un horno de vacío, marca Thelco, modelo 19.

La diferencia entre el horneado simple y el completo es esencialmente la estabilidad que da este último a los picos de bajas temperaturas (ver figura 3.1).

3.3 IRRADIACIÓN GAMMA

3.3.1 FUENTE DE RADIACIÓN

La irradiación de los dosímetros TL con radiación gamma se llevó a cabo en el irradiador Gamma-Cell 200 fabricado por la compañía Atomic Energy of Canada, Ltd., del Instituto de Ciencias Nucleares ICN-UNAM (ver figura 3.2). Este consiste en una serie de 24 barras de ⁶⁰Co colocadas en anillos formando una cavidad cilíndrica resguardada por un blindaje de plomo. Dentro de la cavidad se introduce un émbolo de acero inoxidable que tiene en su extremo inferior un cilindro hueco (8.8 cm de diámetro y 14 cm de altura) que puede subir y bajar mediante un mecanismo eléctrico y en el que se coloca un contenedor cilíndrico de lucita con los dosímetros TL a irradiar.

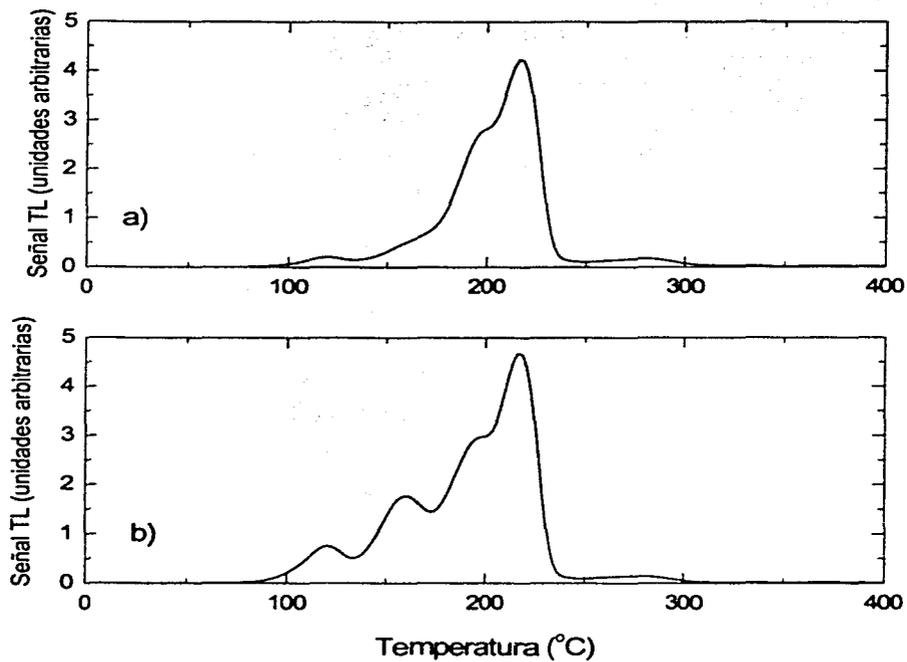


Figura 3.1 Curvas de brillo correspondientes a galletas sometidas a distintos tratamientos térmicos a) horneado completo, b) horneado simple. En ambos casos las curvas corresponden a una irradiación gamma de 1.6 Gy.



Figura 3.2 Gamma-Cell 200

El ^{60}Co decae de la siguiente manera:



Las partículas β^- son detenidas por el blindaje del Gamma-Cell, y por consiguiente la radiación en la cavidad cilíndrica sólo consiste en dos rayos gamma con energía promedio de 1.25 MeV.

Dado que las fuentes de ^{60}Co están fijas, la dosis absorbida por el dosímetro depende únicamente del tiempo de irradiación.

3.3.2 DISPOSITIVO DE IRRADIACIÓN

Los dosímetros TLD-100 a irradiar se colocaron dentro de un cascarón cilíndrico de lucita de 4 mm de espesor y 11.2 mm de diámetro externo, a una altura de 3 cm respecto de la base y al centro de la cavidad cilíndrica (ver figura 3.3).

En cada irradiación se colocaron seis dosímetros, cuatro galletas (dos del lote 1 y dos del lote 2) y dos microcubos. Los dosímetros se colocaron dentro del cascarón cilíndrico de lucita para garantizar el equilibrio de partícula cargada durante la irradiación.



Figura 3.3 Dispositivo de irradiación

3.3.3 IRRADIACIÓN

Dentro del irradiador se conoce la tasa de dosis en agua para la posición donde se colocaron los dosímetros ya que el grupo de dosimetría de la radiación del IFUNAM realizó una calibración previa. El método se describe a continuación.

Esta calibración se realiza mediante dosimetría Fricke (Fr66). La solución del dosímetro Fricke está compuesta de 0.01 M de FeSO_4 y 0.8 M de H_2SO_4 preparada con agua

tridestilada. La diferencia en la concentración molar de iones férricos entre una muestra irradiada y una no irradiada produce un cambio en la densidad óptica $\Delta(OD)$ de las muestras proporcional a la dosis absorbida.

$$D = 278 \Delta(OD) \quad (3.1)$$

La manera de medir el cambio en la concentración molar de iones férricos es mediante espectroscopia de absorción empleando luz de longitud de onda de 304 nm que atraviesa 1 cm de solución.

La tasa de dosis en agua en el GammasCell 200 es de:

$$\dot{D} = 0.97 \text{ Gy en } H_2O / \text{min} \quad (\text{Febrero 2002})$$

Para calcular la dosis absorbida en LiF a partir de la dosis absorbida en agua, se usa la siguiente relación:

$$D_{LiF} = D_{H_2O} \left[\frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{LiF}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{H_2O}} \right]_{Co} \quad (3.2)$$

donde los coeficientes másicos para rayos gammas de 1.25 MeV, $(\mu_{en}/\rho)_{LiF}$ y $(\mu_{en}/\rho)_{H_2O}$ son iguales a $0.0247 \text{ cm}^2/\text{g}$ y $0.0297 \text{ cm}^2/\text{g}$ respectivamente (At86).

3.4 IRRADIACIÓN CON PROTONES

3.4.1 FUENTE DE RADIACIÓN

La irradiación de los dosímetros TL con protones de 3 MeV se realizó en el acelerador de partículas Peletron del IFUNAM, ver figura 3.4.

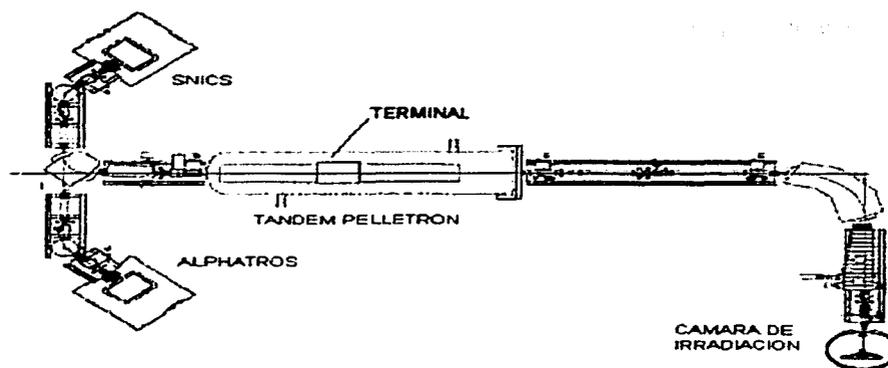


Figura 3.4 Acelerador Peletron del IFUNAM

El proceso de irradiación se realizó seleccionando la fuente de iones Snics. La fuente produce iones negativos (es decir son átomos con un electrón más) ya que el alto voltaje acelerador es positivo. Los iones se inyectan en un extremo del tanque llegando a la terminal con una energía igual a $E_i + eV$, donde E_i es la energía inicial (al inyectar los iones se usa un potencial de 50,000 volts por lo cual al iniciar la aceleración estos ya tienen una energía inicial igual a 50000 eV), e es la carga del electrón y V el voltaje en la terminal. Una vez en la terminal los iones pasan por un canal que contiene nitrógeno (N_2), el cual despoja los iones de sus electrones quedando los iones con carga positiva ne , donde n es el número atómico Z del ión. Estos iones positivos son entonces repelidos por la terminal y adquieren una energía cinética igual a neV . Por lo tanto la energía cinética en ambas etapas está dada por:

$$E = E_i + (1 + n)eV \quad (3.3)$$

donde $n = 1$ para el hidrógeno. Para enfocar el haz se utilizan los cuadrupolos magnéticos que tiene asociados el acelerador.

Por último el haz es dirigido a la cámara de irradiación en la cual se colocan los dosímetros.

3.4.2 DISPOSITIVO DE IRRADIACIÓN

A la entrada de la cámara de irradiación se colocó un colimador de Tantalio de 1.5 mm de diámetro y se hizo incidir el haz en un blanco de oro de 0.366 mg/cm^2

produciéndose dispersión Rutherford de los protones que irradiaron los dosímetros, ver figura 3.5.

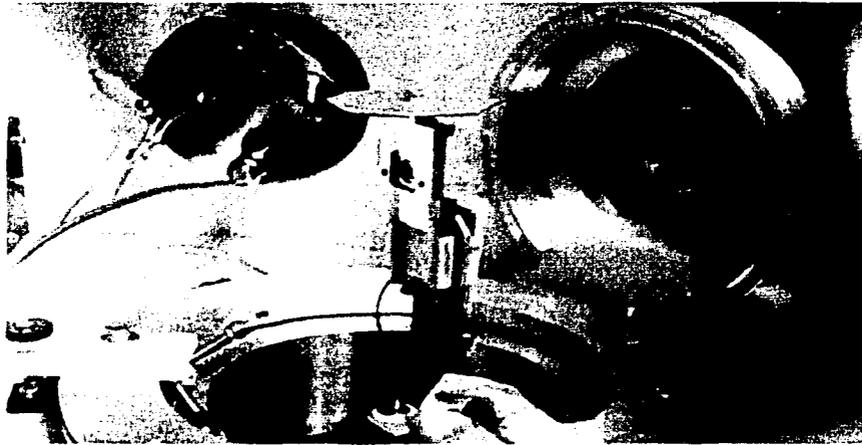


Figura 3.5 Cámara de irradiación del Pelletron

Dado que la dispersión Rutherford tiene simetría axial se usó un dispositivo especial con geometría circular (llamado túnel), que permite que se subtienda el mismo ángulo de dispersión con respecto al blanco y por lo tanto los dosímetros reciben la misma fluencia. Se colocaron 14 dosímetros que fueron asegurados con una cinta de mylar para evitar que se cayeran y se fijaron como se indica en la figura 3.6.

Además, se colocaron dos películas de tinte radiocrómico (PTR) Gafchromic MD55-2 denominadas G^+ sensibles a bajas dosis en la posición mostrada en la figura anterior (Bu87).

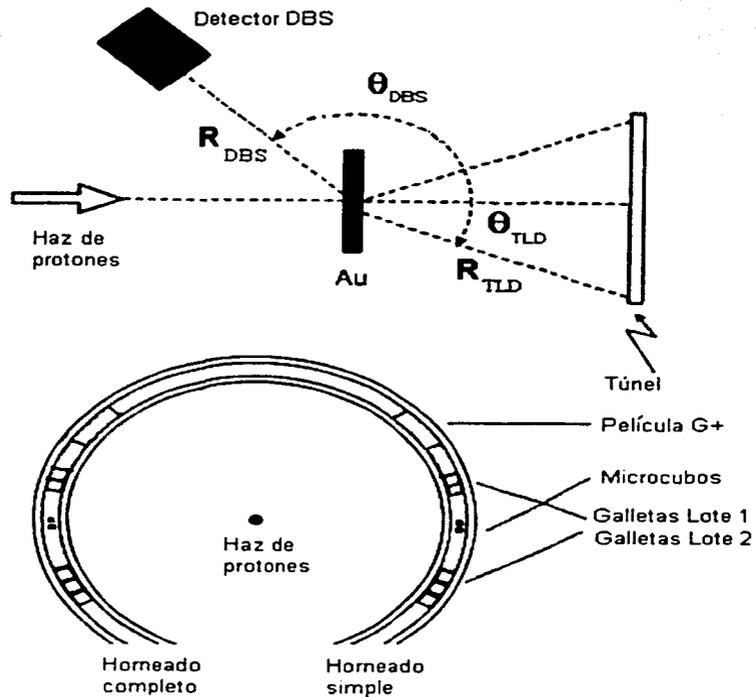


Figura 3.6 Dispositivo de irradiación (túnel). Arriba: Esquema de la geometría usada para la irradiación, dentro de la cámara de irradiación. Abajo: Vista lateral del túnel que se usó para irradiar los cristales y como se pusieron estos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4.3 IRRADIACIÓN

Se realizaron dos corridas en el acelerador Peletron con protones de 3 MeV, a dos fluencias que llamaremos alta (ϕ_a) y baja (ϕ_b) fluencia. Para medir la eficiencia TL relativa se debe medir la respuesta en la zona lineal (baja fluencia). Debido a ello y conociendo los resultados reportados en la tesis de Aviles (Av98b) y el artículo de Horowitz (Ho01) se decidió irradiar a una fluencia de 1×10^8 p/cm². Las medidas a alta fluencia se realizaron para conocer con mejor detalle la curva de brillo e investigar si se producen diferencias en la distribución de los picos de alta temperatura al cambiar el protocolo de trabajo. La figura 3.6 muestra el arreglo experimental dentro de la cámara de irradiación del acelerador.

Para la medición de la fluencia se utilizó el detector de barrera superficial (DBS) y la relación entre el número de partículas dispersadas que llegan al detector y el número de partículas dispersadas que llegan a los dosímetros está dada por:

$$N(\theta_{TLD}) = \frac{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{DBS}}{2}\right) \Delta\Omega_{TLD}}{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{TLD}}{2}\right) \Delta\Omega_{DBS}} N(\theta_{DBS}) \quad (3.4)$$

donde $N(\theta_{TLD})$ es el número de partículas dispersadas que inciden sobre los dosímetros TL, $N(\theta_{DBS})$ es el número de partículas dispersadas que inciden sobre el detector, θ_{TLD} y θ_{DBS} son los ángulos en los que son colocados los dosímetros TL y el detector DBS, respectivamente, Ω_{TLD} y Ω_{DBS} son los ángulos sólidos subtendidos por el área del dosímetro y el área sensible del detector, respectivamente.

Dividendo la ecuación anterior entre el área del dosímetro TL (A_{TLD}), obtenemos la fluencia dada por:

$$\phi(\theta_{TLD}) = \frac{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{DBS}}{2}\right) \Delta\Omega_{TLD} N(\theta_{DBS})}{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{TLD}}{2}\right) \Delta\Omega_{DBS} A_{TLD}} \quad (3.5)$$

El ángulo sólido se calcula mediante la expresión:

$$\Delta\Omega = \frac{A}{R^2}$$

donde R es la distancia al blanco y A es el área del objetivo.

Por lo tanto, podemos describir la ecuación (3.5) como:

$$\phi(\theta_{TLD}) = N(\theta_{DBS}) \frac{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{DBS}}{2}\right)}{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{TLD}}{2}\right)} \frac{1}{A_{DBS}} \left(\frac{R_{DBS}}{R_{TLD}}\right)^2 \quad (3.6)$$

donde R_{DBS} y R_{TLD} son las distancias del blanco al detector y del blanco a los dosímetros respectivamente, A_{DBS} es el área sensible del detector.

La relación entre el número de partículas dispersadas se puede deducir fácilmente si consideramos que el número de protones dispersados a un ángulo θ está dado por:

$$N(\theta) = N_0 \left(\frac{N_A}{A}\right) \rho x \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) \Delta\Omega \quad (3.7)$$

donde $N(\theta)$ es el número de protones dispersados al ángulo θ , N_0 es el número de protones incidentes, N_A es el número de Avogadro, A es la masa atómica, ρx es el espesor másico del blanco, $(d\sigma/d\Omega)$ es la sección eficaz de dispersión elástica y $\Delta\Omega$ es el ángulo sólido.

La sección eficaz de dispersión elástica está dada por la relación de Rutherford:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left(\frac{1}{4E}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{sen}^4\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right) \quad (3.8)$$

en donde z es el número atómico del proyectil, Z es el número atómico del blanco, E es la energía del proyectil, θ es el ángulo de dispersión y e es la carga del electrón. Si consideramos la ecuación (3.7) para dos ángulos diferentes y hacemos su cociente entonces se obtiene la ecuación (3.4).

En la siguiente tabla se muestran los valores de las variables involucradas en la ecuación (3.6), así como los valores de la fluencia para las dos corridas experimentales realizadas en el acelerador Peletron del IFUNAM.

La incertidumbre de la fluencia se calcula de la manera indicada en el apéndice A siguiendo el procedimiento de la referencia (Av98b).

Por otra parte, también se debe corregir la energía del haz de radiación de los protones debido a la pérdida de energía que sufren al atravesar el blanco y el mylar antes de incidir en los dosímetros. Los detalles de esta corrección se muestran en el apéndice B.

| VARIABLE | CORRIDA EN EL ACELERADOR | |
|------------------------|--|--|
| | PRIMERA | SEGUNDA |
| θ_{DBS} | $135^{\circ} \pm 1^{\circ}$ | $135^{\circ} \pm 1^{\circ}$ |
| θ_{TLD} | $36^{\circ} \pm 1^{\circ}$ | $36^{\circ} \pm 1^{\circ}$ |
| R_{DBS} | 11.2 ± 0.1 cm | 11.1 ± 0.1 cm |
| R_{TLD} | 10.3 ± 0.6 cm | 10.3 ± 0.5 cm |
| r_{DBS} | $9.9 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-4}$ cm | $9.9 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-4}$ cm |
| $N_b(\theta_{DBS})$ | 33025±268 | 33364±273 |
| $N_a(\theta_{DBS})$ | 3345403±61023 | 3337040±51193 |
| $\phi_b(\theta_{TLD})$ | $10.0 \times 10^7 \pm 3.8 \times 10^7$ p/cm ² | $10.1 \times 10^7 \pm 3.8 \times 10^7$ p/cm ² |
| $\phi_a(\theta_{TLD})$ | $1.0 \times 10^{10} \pm 3.9 \times 10^9$ p/cm ² | $1.0 \times 10^{10} \pm 3.8 \times 10^9$ p/cm ² |

Tabla 3.4 Valores de las variables involucradas en la ecuación 3.6 (donde θ_{DBS} es el ángulo al detector DBS, θ_{TLD} es el ángulo a los dosímetros TL, R_{DBS} es el distancia del blanco al detector, R_{TLD} es la distancia del blanco a los dosímetros, r_{DBS} es el radio del colimador del detector DBS, $N_b(\theta_{DBS})$ y $N_a(\theta_{DBS})$ son el número de partículas a baja y alta fluencia que inciden en el detector respectivamente, $\phi_b(\theta_{TLD})$ y $\phi_a(\theta_{TLD})$ son las fluencias baja y alta a que se sometieron los dosímetros, respectivamente

3.5 LECTURA

Los dosímetros TL se leyeron en los equipos lectores pertenecientes a los laboratorios de dosimetría del IFUNAM y del ININ a los que llamaremos equipo A y equipo B respectivamente, ver tabla 3.5.

| DENOMINACIÓN | CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO | INSTITUCIÓN |
|--------------|---|-------------|
| Equipo A |  Harshaw 3500 | IFUNAM |
| Equipo B |  Harshaw 4000 | ININ |

Tabla 3.5 Equipos lectores

Los equipos lectores consisten básicamente de un tubo fotomultiplicador que recibe la luz emitida por el dosímetro que se calienta en la plancheta a una rapidez de calentamiento constante. Esta luz se convierte en una carga eléctrica proporcional a luz recibida. El tubo fotomultiplicador está conectado a un circuito analógico digital que recibe la carga y la transforma en una señal digital que se muestra en un monitor del computador asociado al equipo. Integrando esta señal en el intervalo de calentamiento se determina la carga eléctrica (señal TL) que es proporcional a la dosis impartida al dosímetro (ver figura 3.7).

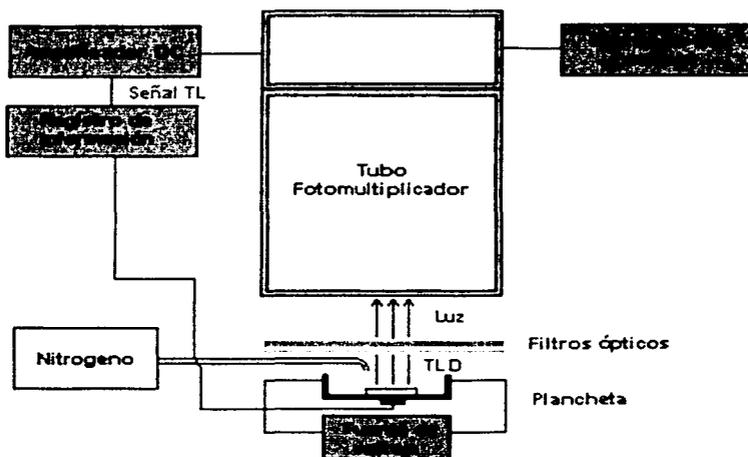


Figura 3.7 Diagrama de bloques de un equipo lector TLD.

3.6 PROTOCOLOS

Para poder realizar nuestro estudio de la dependencia de los factores experimentales sobre la medición de la eficiencia relativa termoluminiscente η se establecieron 4 protocolos de trabajo que se esquematizan en la tabla 3.6

| PROTOCOLO | HORNEADO | LECTURA | RAPIDEZ DE CALENTAMIENTO (°C s ⁻¹) |
|-----------|----------|----------|--|
| 1 | Completo | Equipo A | 1 |
| 2 | Sencillo | Equipo B | 2 |
| 3 | Completo | Equipo B | 2 |
| 4 | Sencillo | Equipo A | 1 |

Tabla 3.6 Protocolos de trabajo

Recordemos que estos protocolos se aplican variando la presentación y el lote por lo que para cada protocolo de trabajo se utilizaron 6 dosímetros, 2 galletas del lote 1, 2 galletas del lote 2 y 2 microcubos.

Los protocolos de trabajo se aplicaron de la siguiente manera

1. Horneado de los dosímetros
2. Irradiación
3. Lectura

Entre cada proceso se esperaron 24 horas para estabilizar la configuración electrónica de los dosímetros.

3.7 CURVA DE BRILLO

La descomposición de la curva de brillo en sus picos componentes se realizó empleando el software comercial de Harshaw/Filtrol conocido como CGCD, el cual usa la aproximación de Podgorsak (Po71) para una forma de la curva de brillo dada por la cinética de primer orden de Randall y Willkins.

Cada pico es calculado por la ecuación:

$$\begin{aligned}
 \rho_i &= I_{mi} \exp \left[1 + \frac{E_i}{kT_{mi}^2} \Delta T_i - \exp \left(\frac{E_i}{kT_{mi}^2} \Delta T_i \right) \right] \\
 &= I_{mi} \exp \left[1 + W_i (X - X_o) - \exp(W_i (X - X_o)) \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

donde I_{mi} es la altura del pico i , T_{mi} es la temperatura del máximo de la curva de brillo, T_i es la temperatura, $\Delta T_i = T_i - T_{mi}$, E_i es la energía de activación del i -ésimo pico, k es la constante de Boltzmann, $W_i = E_i / kT_{mi}^2$ es un parámetro que está relacionado con el

ancho de la curva de brillo a la mitad de la altura, $\omega = 2.44 / W_i X_{oi}$ es la posición del pico i y X es la variable independiente.

La curva de brillo tiene la forma:

$$Y(X) = \sum_i P_i(X) + C + a \exp(X/b) \quad (3.11)$$

donde C es la señal de fondo constante ajustable y $a \exp(X/b)$ es la contribución de la emisión en el infrarrojo de la plancheta y el dosímetro sin irradiar.

Las ecuaciones anteriores asumen que los electrones liberados no pueden ser reatrapados.

Para realizar la deconvolución el programa tiene tres opciones para dar los posibles parámetros iniciales (ancho, altura y posición)

1. Marcar la altura y la posición de cada pico sobre la curva de brillo.
2. Proponer los valores iniciales de los parámetros.
3. Automática, el programa los propone los parámetros iniciales.

Además, permite quitar la señal de fondo debida a la emisión térmica de la plancheta y el primer pico de la curva.

En este trabajo se usó la segunda opción proponiendo valores tanto para el ancho como para la posición y dejando libres las alturas para que el programa las ajustara, y quitando la señal de fondo y la contribución del pico 2 de la curva de brillo.

La deconvolución que se utilizó considera que existen picos 3, 4, 5, 6a, 6b, 7, 8, y 9. Los picos 6a y 6b fueron propuestos por el Prof. Y. S. Horowitz de la Universidad de Ben Gurion, Israel, debido a ello se denomina a la deconvolución tipo H (Av99).

Dado que se usaron distintas presentaciones de los dosímetros (galletas y microcubos) y diferentes equipos lectores (A y B) cada uno con diferente rapidez de calentamiento, fue necesario usar distintos parámetros de deconvolución según el caso. En el caso de la presentación, se observa que para los microcubos hay un desplazamiento hacia la derecha de la curva de brillo en temperatura con respecto a las galletas (ver figura 3.8). Una posible explicación a esto radica en el hecho de que microcubos y galletas presentan distintas áreas de contacto con la plancheta siendo de 1 y 10.1 mm², respectivamente. Esto significa que, para los microcubos, la transferencia de calor a través de la plancheta es más ineficiente provocando un retraso en el tiempo en que el cristal alcanza la temperatura de la plancheta. Es decir, que entonces la posición de los picos de la curva de brillo se encuentra a una temperatura ligeramente mayor cuando usamos microcubos. Con respecto a la rapidez de calentamiento de la plancheta del

equipo lector, podemos observar que según la ecuación (2.5) del capítulo 2, al aumentar la rapidez de calentamiento se tiene un desplazamiento de los máximos de los picos de brillo hacia temperaturas mayores, dando como resultado un efecto similar al del caso anterior (ver figura 3.9).

Por otra parte, sabemos que distintos tipos de radiación tienen curvas de brillo diferentes, debido a la forma como se deposita la energía en el dosímetro. Para el caso de los protones (radiación ionizante) estos sólo alcanzan a penetrar unas cuantas micras del dosímetro mientras que la radiación gamma de ^{60}Co (radiación indirectamente ionizante) lo atraviesa completamente. Esto repercute en diferencias en la captura de electrones por las trampas y por consiguiente los parámetros de la deconvolución para un tipo de radiación serán distintos a los de otra.

Considerando estos factores se realizaron varios ajustes en los parámetros mencionados hasta obtener (ver figuras 3.10 y 3.11). El conjunto de parámetros utilizados se muestra en las tablas 3.7 y 3.8. Las incertidumbres reportadas para T_m corresponden a la desviación estándar de las integrales obtenidas mediante la deconvolución de las curvas de brillo para los dos dosímetros irradiados en cada caso.

| PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS DECONVOLUCIONES DEL EQUIPO A (IFUNAM) | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| PICO | GAMMAS | | | | PROTONES | | | |
| | GALLETAS | | MICROCUBOS | | GALLETAS | | MICROCUBOS | |
| | ANCHO (°C) | T _m (°C) |
| 3 | 30 | 152±0.8 | 31.6 | 152±2.2 | 32 | 152±1.2 | 40 | 154±2.4 |
| 4 | 24 | 186±1.0 | 27.2 | 190±0.8 | 32 | 184±1.2 | 34 | 192±3.2 |
| 5 | 26 | 212±0.2 | 26 | 224±0.4 | 26 | 214±1.2 | 30 | 226±3.4 |
| 6a | 30 | 226±0.2 | 32 | 240±0 | 30 | 230±2.2 | 32 | 244±3.4 |
| 6b | 30 | 250±0.2 | 32 | 260±0 | 30 | 252±2.0 | 32 | 264±3.2 |
| 7 | 36 | 274±0.6 | 38 | 286±0 | 36 | 276±1.6 | 38 | 288±3.6 |
| 8 | 36 | 304±2.2 | 40 | 312±0 | 36 | 300±5.2 | 40 | 312±3.4 |
| 9 | 36 | 334±0.0 | 38 | 348±0 | 36 | 334±0.8 | 38 | 352±2.6 |

Tabla 3.7 Parámetros usados en la deconvolución de las curvas de brillo de los dosímetros TL sometidos a los protocolos 1 y 4.

| PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS DECONVOLUCIONES DEL EQUIPO B (ININ) | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| PICO | GAMMAS | | | | PROTONES | | | |
| | GALLETAS | | MICROCUBOS | | GALLETAS | | MICROCUBOS | |
| | ANCHO (°C) | T _m (°C) |
| 3 | 27 | 158±0.6 | 30 | 158±1.2 | 32 | 158±2.6 | 32 | 160±0.6 |
| 4 | 26.8 | 190±1.0 | 27.2 | 192±1.4 | 32 | 190±2.6 | 28 | 194±0.6 |
| 5 | 24.8 | 216±0.4 | 26 | 226±1.6 | 25 | 218±2.2 | 29 | 226±1.0 |
| 6a | 30 | 230±0.0 | 32 | 240±0.0 | 30 | 232±1.6 | 32 | 244±2.0 |
| 6b | 30 | 252±1.0 | 32 | 260±0.0 | 30 | 256±1.8 | 32 | 264±2.0 |
| 7 | 36 | 276±1.2 | 38 | 286±0.0 | 36 | 280±2.0 | 38 | 286±0.6 |
| 8 | 36 | 306±0.4 | 40 | 312±0.0 | 36 | 306±2.2 | 40 | 306±3.4 |
| 9 | 36 | 336±0.4 | 38 | 248±0.0 | 36 | 336±1.6 | 38 | 352±0.0 |

Tabla 3.8 Parámetros usados en la deconvolución de las curvas de brillo de los dosímetros TL sometidos a los protocolos 2 y 3.

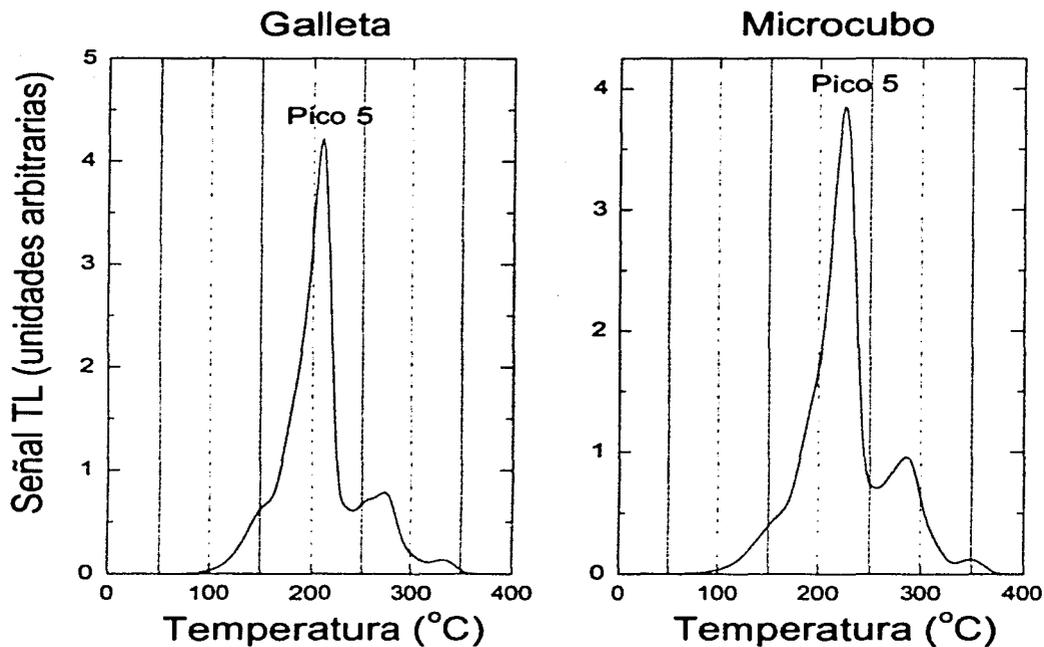


Figura 3.8 Curvas de brillo correspondientes a una galleta del lote 1 y un microcubo sometidos a horneado completo e irradiados con baja fluencia de protones de 3 MeV (1×10^8 p/cm²); la lectura se realizó en el equipo lector A. En esta figura se puede observar el desplazamiento de la curva de brillo hacia la derecha en la curva correspondiente al microcubo (observar la posición del pico 5).

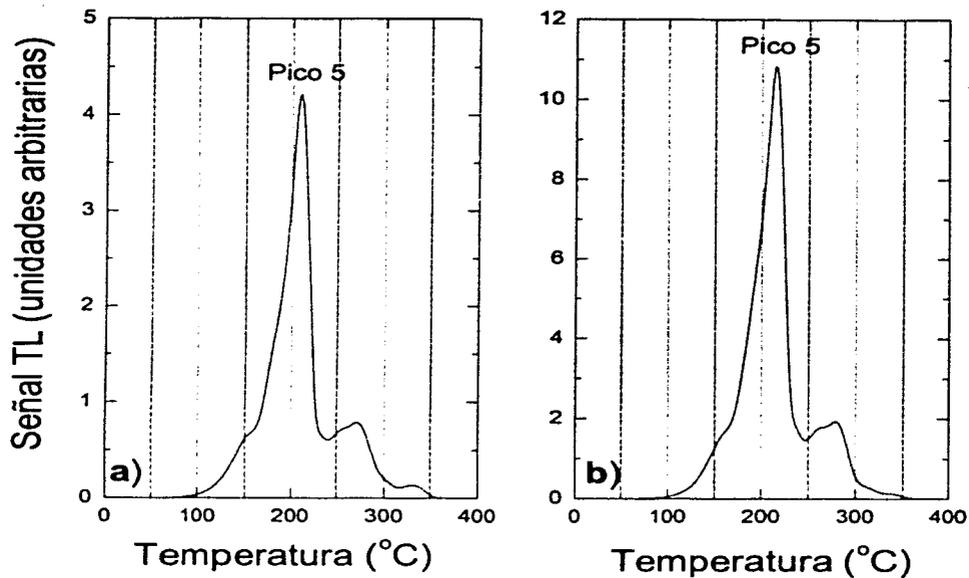


Figura 3.9 Curvas de brillo correspondientes a galletas del lote 1 sometidas a horneado completo e irradiadas con baja fluencia de protones de 3 MeV (1×10^8 p/cm²). En esta figura se puede observar el desplazamiento debido al cambio de la rapidez de calentamiento, a) Lectura en el equipo lector A (rapidez de calentamiento 1°C/s), b) Lectura en el equipo lector B (rapidez de calentamiento 2 °C/s).

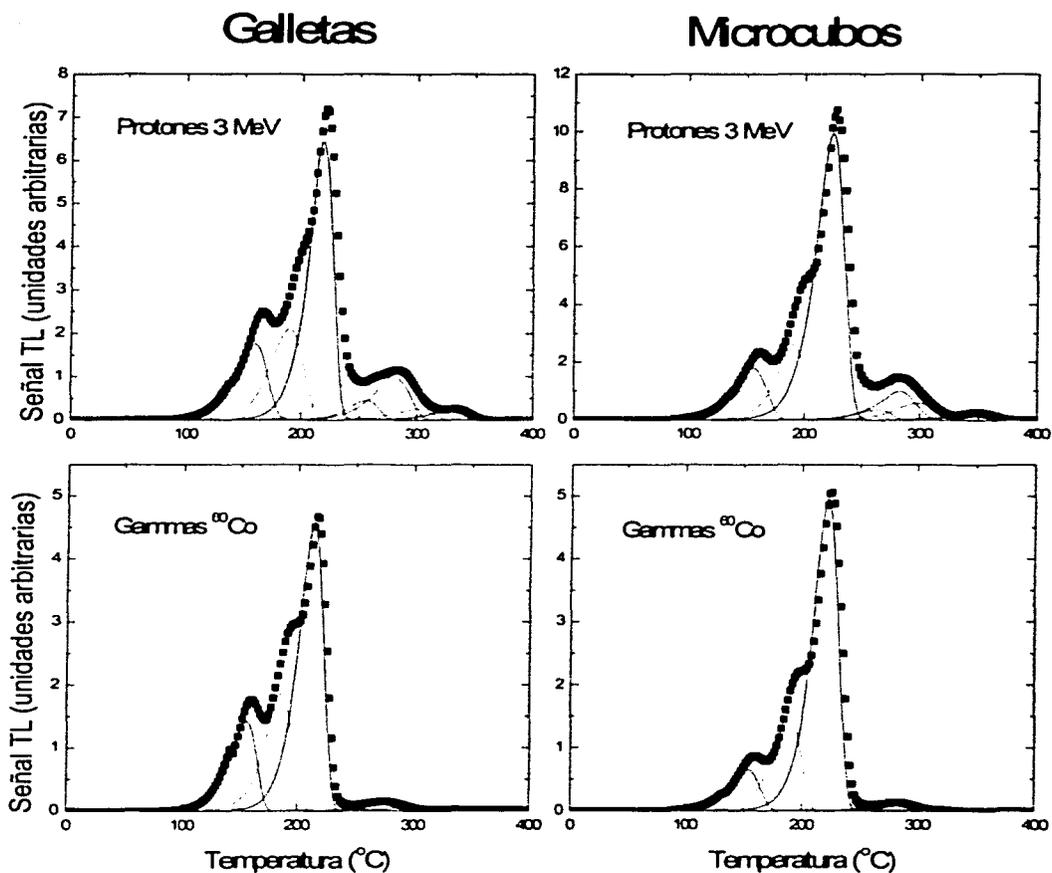


Figura 3.10 Deconvolución de la curva de brillo para galletas y microcubos sometidos al protocolo 2 (horneado sencillo y lectura en el equipo lector B, ININ).

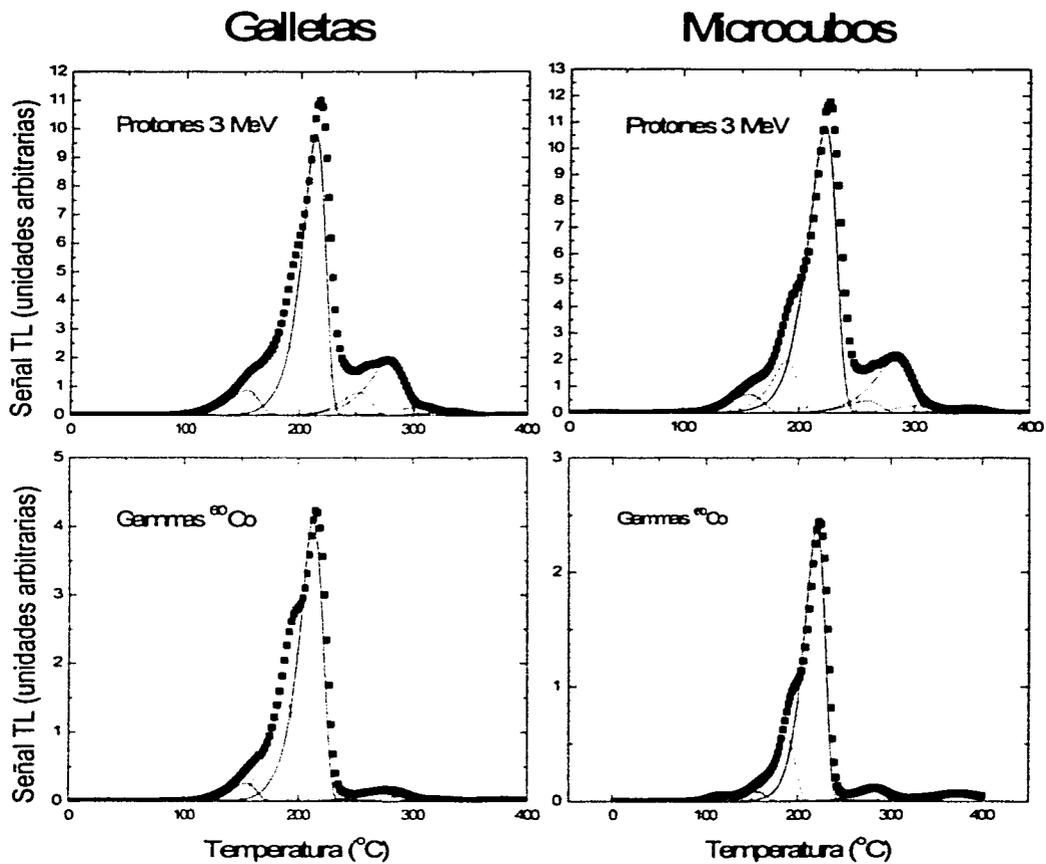


Figura 3.11 Deconvolución de la curva de brillo para galletas y microcubos sometidos al protocolo 3 (homeado completo y lectura en el equipo lector B, ININ).

4 RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los valores de la señal TL para cada pico de la curva de brillo y la señal total TL para dosímetros expuestos a baja y alta fluencia de protones, se determinan los valores de $\eta_{P,\gamma}$ para cada protocolo de trabajo y la combinación de estos (obteniendo el denominador de ecuación (1.2) con un procedimiento distinto al usado para obtener el numerador).

4.1 SEÑAL TERMOLUMINISCENTE

Efectuando las deconvoluciones con los parámetros indicados al final del capítulo anterior se obtuvieron las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, que muestran el promedio de la señal TL total y la integral de cada pico para los dos dosímetros utilizados en cada protocolo, para baja fluencia de protones y gammas. Las figuras 4.1 y 4.2 muestran las curvas de brillo para protones de alta fluencia y las tablas 4.4 y 4.5, muestran el promedio de la señal TL total y la integral de cada pico para los dos dosímetros utilizados en cada protocolo, para alta fluencia de protones. La incertidumbre de la señal TL reportada en las tablas 4.1 a 4.5 corresponde a la diferencia del promedio a una de las lecturas. Los resultados de alta fluencia se discutirán en el siguiente capítulo.

Para los protocolos 2 y 3 los valores de la señal TL de las gammas tuvieron que ser corregidas debido a que las lecturas se realizaron después de un procedimiento de limpieza de los componentes electrónicos del equipo B (Harshaw 4000) por personal calificado. Esto ocasionó que las lecturas se incrementaran en aproximadamente un 50%. La corrección se logró hacer gracias a que se contaba con los valores de la señal TIL de dos galletas de diferente lote del protocolo 3, irradiados a una dosis conocida y leídos en el equipo B, previamente a la limpieza del equipo. Este proceso se repitió después de la

limpieza del equipo y los valores de la señal TL antes (mayo 2001) y después (agosto 2001) de la limpieza se reportan en tabla 4.6, así como el cociente de ambas.

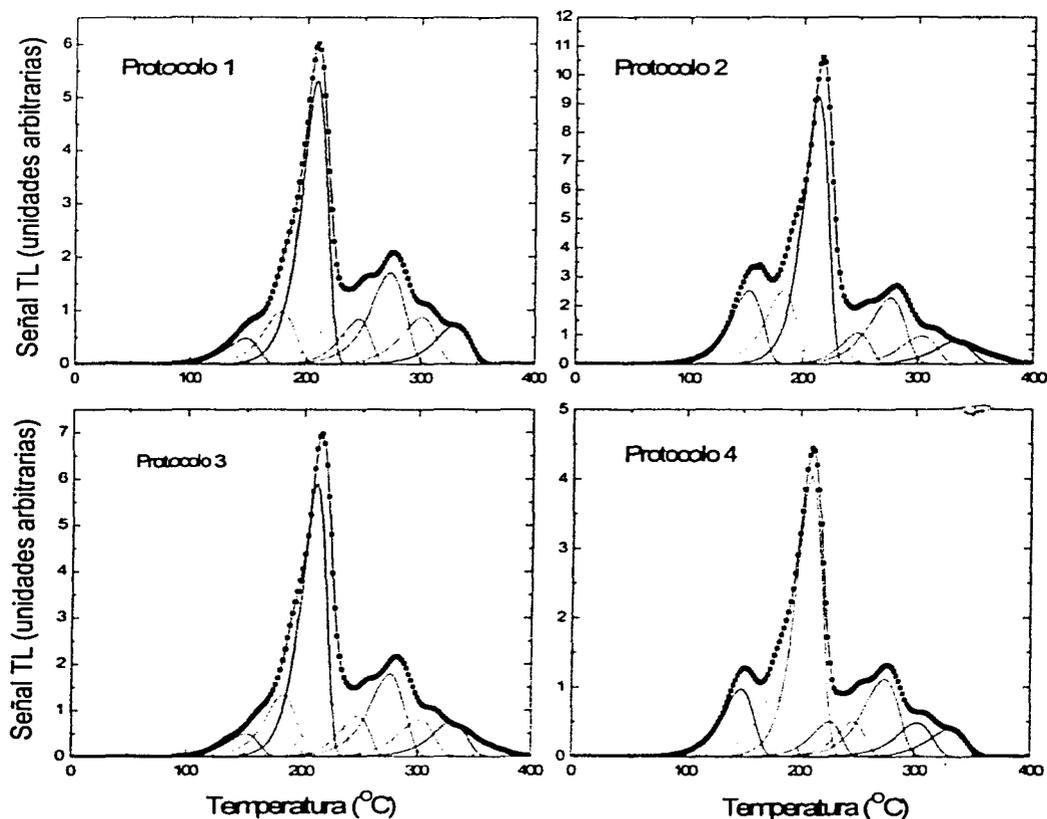


Figura 4.1 Deconvolución de la curva de brillo de galletas irradiadas con alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²) sometidos a los protocolos 1 (homeado completo, equipo lector A), 2 (homeado sencillo, equipo lector B), 3 (homeado completo, equipo lector B) y 4 (homeado sencillo, equipo lector A).

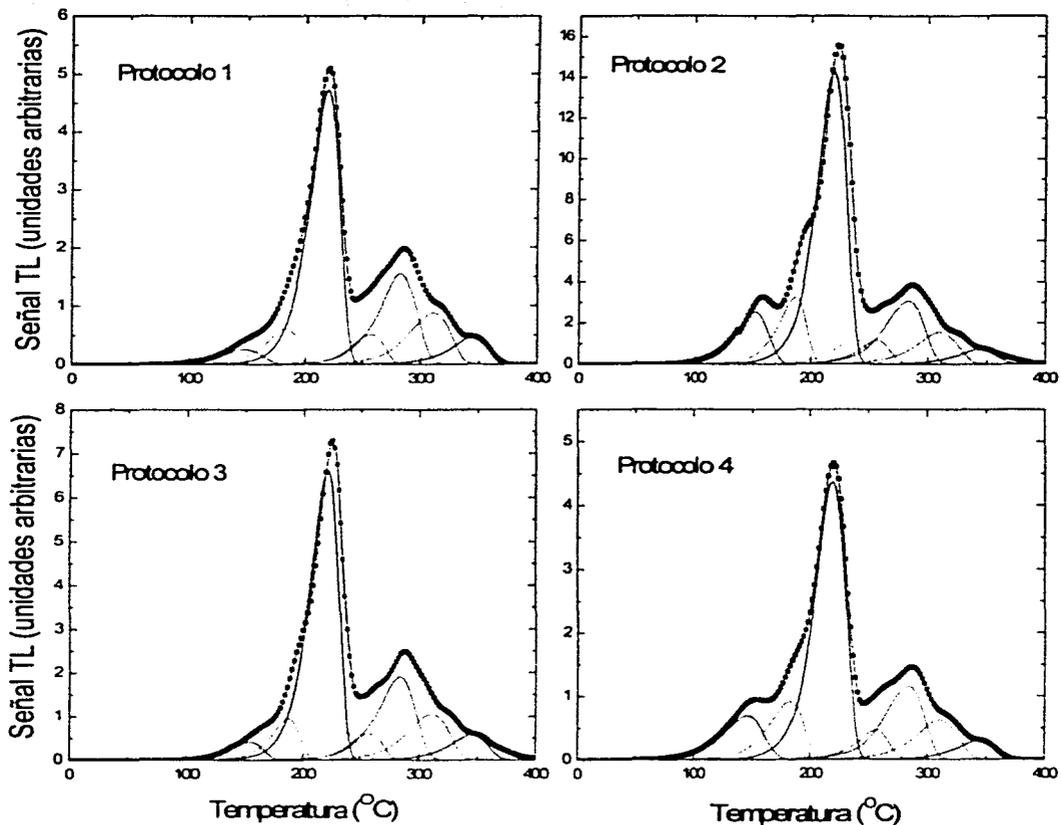


Figura 4.2 Deconvolución de la curva de brillo de microcubos irradiados con alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²) sometidos a los protocolos 1 (horneado completo, equipo lector A), 2 (horneado sencillo, equipo lector B), 3 (horneado completo, equipo lector B) y 4 (horneado sencillo, equipo lector A).

| PICO | SEÑAL TL (nC) | | | | | | | |
|-------------|---------------|-------------|---------------|------------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 4 | |
| | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS |
| 3 | 65 ± 1 | 969 ± 110 | 40544 ± 1220 | 1021946 ± 27238 | 16117 ± 713 | 190787 ± 2191 | 172 ± 2 | 3624 ± 197 |
| 4 | 149 ± 1 | 3058 ± 23 | 43649 ± 987 | 1326402 ± 30637 | 46575 ± 1783 | 1059254 ± 12969 | 150 ± 4 | 3355 ± 162 |
| 5 | 558 ± 5 | 10181 ± 63 | 110136 ± 597 | 3021063 ± 78804 | 140579 ± 3968 | 2739386 ± 40495 | 483 ± 4 | 10044 ± 490 |
| 6a | 72 ± 1 | 139 ± 3* | 14360 ± 808 | 42824 ± 852 | 23901 ± 945 | 88900 ± 7498 | 45 ± 2 | 139 ± 3* |
| 6b | 52 ± 3 | 139 ± 3* | 7943 ± 442 | 43258 ± 577 | 13410 ± 290 | 26820 ± 1816 | 33 ± 3 | 139 ± 3* |
| 7 | 142 ± 7 | 606 ± 21 | 22477 ± 780 | 108732 ± 1664 | 36715 ± 522 | 139503 ± 2380 | 94 ± 2 | 467 ± 3 |
| 8 | 38 ± 1 | 113 ± 4 | 3027 ± 131 | 60976 ± 5249 | 5760 ± 103 | 65754 ± 3893 | 21 ± 1 | 78 ± 1 |
| 9 | 28 ± 2 | 32 ± 1 | 4998 ± 169* | 7387 2 ± 247* | 2599 ± 124* | 8791 ± 25 | 20 ± 2* | 23 ± 1 |
| SEÑAL TOTAL | 1087 ± 5 | 15217 ± 231 | 247135 ± 4965 | 5632588 ± 134524 | 285654 ± 8323 | 4319195 ± 43725 | 1006 ± 16 | 17848 ± 853 |

Tabla 4 1 Galletas Lote 1, señal TL (nC) para cada pico de la curva brillo y la señal total, para baja fluencia de protones (1×10^8 p/cm²) y gammas de 1.67 Gy.

(*) La incertidumbre es una aproximación debido a que en estos casos se fijaron los parámetros de la deconvolución para tener un buen ajuste.

| PICO | SEÑAL TL (nC) | | | | | | | |
|--------------------|---------------|-------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 4 | |
| | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS |
| 3 | 57 ± 2 | 944 ± 10 | 33316 ± 2078 | 867092 ± 9879 | 13203 ± 7 | 176678 ± 5733 | 146 ± 4 | 3192 ± 30 |
| 4 | 136 ± 2 | 2744 ± 30 | 41894 ± 4490 | 1259378 ± 4475 | 41645 ± 1177 | 1034606 ± 13189 | 144 ± 4 | 3319 ± 40 |
| 5 | 512 ± 8 | 9589 ± 139 | 103087 ± 13499 | 2845790 ± 5775 | 134870 ± 5584 | 2685075 ± 443 | 440 ± 5 | 10040 ± 35 |
| 6a | 64 ± 1 | 139 ± 3 | 14755 ± 242 | 63485 ± 8507 | 22306 ± 1003 | 86857 ± 397 | 50 ± 1 | 139 ± 3* |
| 6b | 43 ± 1 | 139 ± 3 | 7831 ± 511 | 30989 ± 1535 | 12113 ± 279 | 27577 ± 817 | 35 ± 2 | 138.6 ± 3* |
| 7 | 123 ± 3 | 605 ± 12 | 22852 ± 3189 | 115718 ± 249 | 34359 ± 987 | 123438 ± 17772 | 96 ± 1 | 516 ± 37 |
| 8 | 31 ± 1 | 112 ± 2 | 4908 ± 58 | 55328 ± 4402 | 6009 ± 106 | 66583 ± 3120 | 21 ± 1 | 92 ± 2 |
| 9 | 28 ± 4 | 31 ± 3 | 4999 ± 1 | 7190 ± 49 | 2499 ± 36* | 8249 ± 25 | 22 ± 2 | 25 ± 3 |
| SEÑAL TOTAL | 974 ± 2 | 14300 ± 184 | 233641 ± 24067 | 5244969 ± 11447 | 267003 ± 8930 | 4209063 ± 1084 | 962 ± 16 | 17420 ± 136 |

Tabla 4.2 Galletas Lote 2, señal TL (nC) para cada pico de la curva brillo y la señal total, para baja fluencia de protones (1×10^8 p/cm²) y gammas de 1.67 Gy

(*) La incertidumbre es una aproximación debido a que en estos casos se fijaron los parámetros de la deconvolución para tener un buen ajuste.

| PICO | SEÑAL TL (nC) | | | | | | | |
|-------------|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 4 | |
| | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS | PROTONES | GAMMAS** | PROTONES | GAMMAS |
| 3 | 53 ± 0.4 | 539 ± 0.8 | 3583 ± 401 | 54418 ± 489 | 1243 ± 4 | 14663 ± 173 | 15.6 ± 0.2 | 184.0 ± 4.8 |
| 4 | 116 ± 1.1 | 210.1 ± 100 | 4509 ± 439 | 107763 ± 371 | 3045 ± 5 | 83042 ± 979 | 17.6 ± 1.0 | 306.8 ± 6.9 |
| 5 | 549 ± 4.4 | 8596 ± 291 | 17758 ± 1733 | 344745 ± 8424 | 17656 ± 169 | 333502 ± 3935 | 58.5 ± 0.7 | 995.9 ± 21.4 |
| 6a | 69 ± 0.2 | 257 ± 2.9 | 1274 ± 73 | 8405 ± 412* | 1578 ± 39 | 8405 ± 99 | 8.0 ± 0.3 | 18.1 ± 2.1* |
| 6b | 42 ± 0.1 | 182 ± 2.5 | 767 ± 143 | 3152 ± 151* | 864 ± 50 | 4027 ± 48 | 3.7 ± 0.6 | 18.1 ± 2.1* |
| 7 | 150 ± 1.8 | 436 ± 0.7 | 2565 ± 489 | 13126 ± 650 | 4131 ± 50 | 14815 ± 175 | 10.1 ± 0.6 | 40.0 ± 0.7 |
| 8 | 45 ± 1.5 | 53 ± 1.6 | 1195 ± 69 | 2835 ± 712 | 1214 ± 578 | 2999 ± 35 | 5.1 ± 0.9 | 7.1 ± 0.3 |
| 9 | 0.3 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | 641 ± 118 | 312 ± 208 | 576 ± 196 | 416 ± 5 | 0.1 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 |
| SEÑAL TOTAL | 1020 ± 9.2 | 12033 ± 386 | 32294 ± 3327 | 534756 ± 6736 | 30307 ± 913 | 461869 ± 5449 | 118.0 ± 2.6 | 1556.6 ± 33.2 |

Tabla 4.3 Microcubos, señal TL (nC) para cada pico de la curva brillo y la señal total, para baja fluencia de protones (1×10^8 p/cm²) y gammas de 1.67 Gy.

(*) La incertidumbre es una aproximación debido a que en estos casos se fijaron los parámetros de la deconvolución para tener un buen ajuste.

(**) La incertidumbre para esta columna es una aproximación debido a que sólo se tenía una curva de brillo

| PICO | SEÑAL TL (nC) | | | | | | | |
|--------------------|---------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 4 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| 3 | 8996 ± 517 | 6501 ± 636 | 4196909 ± 280940 | 3914756 ± 172822 | 1743982 ± 6519 | 11516011 ± 144127 | 21502 ± 971 | 17555 ± 250 |
| 4 | 18137 ± 825 | 13429 ± 1203 | 4220589 ± 265388 | 4483746 ± 140631 | 4569359 ± 164450 | 4207981 ± 228249 | 17183 ± 1119 | 16045 ± 249 |
| 5 | 79386 ± 2655 | 58818 ± 6151 | 12100391 ± 759355 | 12848505 ± 524778 | 10036418 ± 326280 | 14915348 ± 659202 | 64060 ± 3086 | 58246 ± 236 |
| 6a | 13765 ± 717 | 10691 ± 941 | 2314551 ± 154425 | 2467892 ± 79361 | 3854907 ± 119457 | 3597553 ± 215050 | 8261 ± 697 | 8462 ± 143 |
| 6b | 14118 ± 161 | 10361 ± 730 | 1654885 ± 108387 | 18799920 ± 79643 | 2821192 ± 84093 | 2619348 ± 168688 | 9625 ± 646 | 8833 ± 507 |
| 7 | 35391 ± 1357 | 26601 ± 1989 | 4255501 ± 296458 | 4901002 ± 159293 | 6880807 ± 258275 | 6354166 ± 391215 | 23114 ± 1444 | 22486 ± 45 |
| 8 | 17299 ± 109 | 12903 ± 895 | 1740303 ± 151210 | 2043141 ± 83582 | 2945279 ± 147323 | 2744093 ± 164438 | 9971 ± 601 | 10221 ± 571 |
| 9 | 14288 ± 74 | 11620 ± 361 | 1571223 ± 5057 | 1940122 ± 7367 | 2932374 ± 62960 | 2849102 ± 227417 | 8010 ± 858 | 8241 ± 150 |
| SEÑAL TOTAL | 201371 ± 6049 | 150924 ± 12905 | 32054353 ± 2021222 | 34479084 ± 1088755 | 41784317 ± 1169356 | 38803601 ± 2198386 | 161726 ± 10423 | 150089 ± 1677 |

Tabla 4.4 Galletas, señal TL (nC) para cada pico de la curva brillo y la señal total, para alta fluencia de protones (1×10^8 p/cm²).

| PICO | SEÑAL TL (nC) | | | |
|--------------------|---------------|------------------|------------------|-------------|
| | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 | PROTOCOLO 4 |
| 3 | 594 ± 29 | 421017 ± 26842 | 159675 ± 13465 | 1610 ± 77 |
| 4 | 1354 ± 205 | 480362 ± 26213 | 318581 ± 23279 | 1784 ± 57 |
| 5 | 8602 ± 730 | 2188966 ± 104704 | 2356378 ± 227830 | 7548 ± 266 |
| 6a | 726 ± 9 | 204096 ± 10526 | 255522 ± 33794 | 580 ± 41 |
| 6b | 1040 ± 139 | 200536 ± 4116 | 221430 ± 9280 | 851 ± 27 |
| 7 | 3752 ± 472 | 611107 ± 35395 | 887407 ± 81211 | 2448 ± 8 |
| 8 | 2247 ± 296 | 334995 ± 10323 | 514065 ± 45698 | 1422 ± 31 |
| 9 | 1194 ± 187 | 149055 ± 5829 | 274652 ± 28427 | 652 ± 17 |
| SEÑAL TOTAL | 19508 ± 2065 | 4590134 ± 223947 | 4987710 ± 462985 | 16896 ± 524 |

Tabla 4.5 Microcubos, señal TL (nC) para cada pico de la curva brillo y la señal total, para protones de alta fluencia (1×10^8 p/cm²).

| GALLETAS | SEÑAL TL (nC) | | COCIENTE (DESPUÉS / ANTES) |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| | ANTES DE LA LIMPIEZA DEL EQUIPO | DESPUÉS DE LA LIMPIEZA DEL EQUIPO | |
| LOTE 1 | 4263698 ± 56732* | 8767965 ± 88761 | 2.06 ± 0.21 |
| LOTE 2 | 3844961 ± 54987* | 8544397 ± 2200 | 2.22 ± 0.01 |
| PROMEDIO | 4054329 ± 209368 | 8656181 ± 88778 | 2.13 ± 0.11 |

Tabla 4.6 Lectura de galletas irradiadas con gammas (1.663 Gy), tomadas antes y después de limpieza del equipo lector B (Harshaw 4000).

(*) La incertidumbre para esta columna es una aproximación debido a que sólo se tenía una curva de brillo.

Se utilizó el valor del cociente promedio para corregir las lecturas posteriores a la limpieza del equipo.

4.2 EFICIENCIA RELATIVA TERMOLUMINISCENTE PARA PROTONES CON RESPECTO A GAMMAS DE ^{60}Co

La eficiencia relativa termoluminiscente se definió previamente en la ecuación 1.2 como:

$$\eta = \frac{\left(\frac{\left(\frac{STL}{D} \right)_p}{m_p} \right)}{\left(\frac{\left(\frac{STL}{D} \right)_r}{m_r} \right)} \quad (1.2)$$

Es importante hacer énfasis en que la eficiencia relativa TL es el cociente de la señal TL por unidad de dosis por unidad de masa irradiada para la radiación de interés respecto de la señal TL por unidad de dosis por unidad de masa irradiada para la radiación de referencia. Esto es importante ya que los protones de 3 MeV sólo alcanzan a penetrar unas cuantas micras en el dosímetro de modo que la masa irradiada (m_p) corresponde al volumen definido por el alcance, mientras que la radiación gamma atraviesa el dosímetro de modo que en este caso la masa irradiada (m_r) corresponde a todo el volumen del dosímetro.

El cálculo de la dosis absorbida por la irradiación con protones se realiza utilizando la siguiente ecuación (Mo88):

$$D = \frac{1.6 \times 10^{-10} E \phi}{\rho x} \quad (4.1)$$

donde D [Gy] es la dosis absorbida, ϕ [p/cm^2] es la fluencia, E [MeV] es la energía de los protones al incidir en el dosímetro, x [cm] es el alcance de los protones de energía E en LiF y ρ [g/cm^3] es la densidad del LiF.

Los valores de la energía y la fluencia están dados en la tabla 3.4. El alcance másico de los protones en LiF para una energía de 2.96 MeV es:

$$\rho x = 0.01867 \text{ g}/\text{cm}^2 \text{ (At86)}$$

Sustituyendo en la ecuación (4.1) se obtiene una dosis de 2.53 Gy y 2.54 Gy para la primera y segunda corridas de baja fluencia en el acelerador, respectivamente.

La dosis de los dosímetros irradiados con gammas de ^{60}Co está dada por la ecuación (3.2). Los dosímetros fueron irradiados a una dosis de 1.93 Gy en H_2O que corresponde a una dosis en LiF de 1.608 Gy.

La masa de los dosímetros irradiados con protones está dada por el producto del alcance másico de los protones y el área de exposición a la radiación de los dosímetros:

$$m_p = (\rho x) (0.317)^2 = 0.01867 * (0.3)^2 \text{ g} = 1.88 \times 10^{-3} \text{ g, para las galletas; y}$$

$$m_p = (\rho x) (0.1)^2 = 1.87 \times 10^{-4} \text{ g, para los microcubos}$$

La masa de los dosímetros irradiada por las gammas está dada por el producto del volumen total del dosímetro y la densidad de LiF que es de 2.64 g/cm^3 :

$$m_\gamma = (\rho) (0.89)(0.317)^2 \text{ g} = 2.36 \times 10^{-2} \text{ g, para las galletas; y}$$

$$m_\gamma = (\rho) (0.1)^3 = 2.64 \times 10^{-3} \text{ g, para los microcubos}$$

Con los valores indicados arriba se calcula la eficiencia relativa termoluminiscente η , para el pico 5 y la señal total. Los resultados de η se muestran en las tablas 4.7 a 4.14 y sus respectivas gráficas.

Debido a las diferencias de respuesta de los equipos A y B, así como los distintos parámetros de deconvolución usados en cada uno de ellos, se decidió mostrar resultados en tablas separadas para cada equipo.

Los valores mostrados en el último renglón del encabezado y la última columna del encabezado son los valores del numerador (protones) y denominador (gammas) de la ecuación (4.1) que da la eficiencia relativa termoluminiscente.

Con el propósito de mostrar los resultados de la eficiencia relativa TL, considerando los efectos de variar los distintos factores experimentales, se decidió mostrar las tablas usando distintos tonos de gris de la siguiente manera:

- Eficiencia relativa TL calculada de manera que tanto el numerador como el denominador de la ecuación 1.2 fueron sometidos al mismo protocolo completo (lote, presentación, homeado y equipo)
- Eficiencia relativa TL calculada introduciendo cambios de lote en el denominador
- Eficiencia relativa TL calculada introduciendo cambios de homeado en el denominador.

■ Eficiencia relativa TL calculada introduciendo cambios de lote y horneado en el denominador.

Nótese que los resultados mostrados en la diagonal de izquierda a derecha son los que preservan el mismo protocolo en el numerador y denominador de la ecuación 4.1.

| $\eta = \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_p}{m_p} / \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_y}{m_y}$ | | | | PROTONES | | | |
|--|-------------|--------|--|--|--|--|--|
| | | | | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | | | | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| | | | | 1.31×10^5 $\pm 1.15 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 1.21×10^5 $\pm 1.81 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 1.14×10^5 $\pm 9.76 \times 10^2$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 1.03×10^5 $\pm 1.24 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 1 | LOTE 1 | 2.99×10^5 $\pm 1.86 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.44±0.01 | 0.41±0.01 | 0.38±0.01 | 0.38±0.01 |
| | | LOTE 2 | 2.82×10^5 $\pm 4.08 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.46±0.01 | 0.43±0.01 | 0.37±0.01 | 0.37±0.01 |
| | PROTOCOLO 4 | LOTE 1 | 2.95×10^5 $\pm 1.44 \times 10^4$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.44±0.02 | 0.44±0.01 | 0.39±0.02 | 0.35±0.02 |
| | | LOTE 2 | 2.95×10^5 $\pm 1.01 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.44±0.01 | 0.41±0.01 | 0.39±0.01 | 0.35±0.01 |

Tabla 4.7 Eficiencia para el pico 5 de las galletas del protocolo 1 (horneado completo, equipo lector A) y protocolo 4 (horneado sencillo, equipo lector A).

| $\eta = \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_p}{m_p} / \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_y}{m_y}$ | | | | PROTONES | | | |
|--|-------------|--------|--|--|--|--|--|
| | | | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | | | | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| | | | | 2.56×10^7 $\pm 1.39 \times 10^5$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 2.40×10^7 $\pm 3.14 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 3.27×10^7 $\pm 9.23 \times 10^5$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 3.14×10^7 $\pm 1.30 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 2 | LOTE 1 | 8.47×10^1 $\pm 2.21 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.30±0.01 | 0.28±0.04 | 0.39±0.02 | 0.39±0.02 |
| | | LOTE 2 | 7.98×10^1 $\pm 1.62 \times 10^5$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.32±0.01 | 0.30±0.04 | 0.39±0.01 | 0.40±0.02 |
| | PROTOCOLO 3 | LOTE 1 | 7.68×10^1 $\pm 1.14 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.34±0.01 | 0.34±0.01 | 0.43±0.01 | 0.41±0.02 |
| | | LOTE 2 | 7.53×10^1 $\pm 1.24 \times 10^4$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.34±0.01 | 0.32±0.04 | 0.44±0.01 | 0.42±0.02 |

Tabla 4.8 Eficiencia para el pico 5 de las galletas del protocolo 2 (horneado sencillo, equipo lector B) y protocolo 3 (horneado completo, equipo lector B).

| | | $\eta = \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_p}{m_p} / \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_r}{m_r}$ | PROTONES | |
|--------|-------------|--|---|---|
| | | | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 4 |
| | | | $1.17 \times 10^5 \pm 9.38 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $1.24 \times 10^5 \pm 1.42 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 1 | $2.03 \times 10^5 \pm 5.04 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.58 ± 0.05 | 0.62 ± 0.02 |
| | PROTOCOLO 4 | $2.35 \times 10^5 \pm 6.86 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.49 ± 0.04 | 0.53 ± 0.01 |

Tabla 4.9 Eficiencia para el pico 5 de los microcubos del protocolo 1 (horneado completo, equipo lector A) y protocolo 4 (horneado sencillo, equipo lector A).

| | | $\eta = \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_p}{m_p} / \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_r}{m_r}$ | PROTONES | |
|--------|-------------|--|---|---|
| | | | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 |
| | | | $3.69 \times 10^7 \pm 3.61 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $3.68 \times 10^7 \pm 3.53 \times 10^5$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 2 | $7.49 \times 10^7 \pm 3.13 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.47 ± 0.05 | 0.47 ± 0.01 |
| | PROTOCOLO 3 | $7.74 \times 10^7 \pm 1.89 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.49 ± 0.05 | 0.49 ± 0.01 |

Tabla 4.10 Eficiencia para el pico 5 de los microcubos del protocolo 2 (horneado sencillo, equipo lector B) y protocolo 3 (horneado completo, equipo lector B).

| | | $\eta = \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_P}{m_p} / \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_T}{m_T}$ | | PROTONES | | | |
|--------|-------------|--|---|---|---|---|---|
| | | | | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | | | | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| | | | | $2.56 \times 10^5 \pm 1.12 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $2.29 \times 10^5 \pm 4.59 \times 10^2$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $2.34 \times 10^5 \pm 3.89 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $2.19 \times 10^5 \pm 3.77 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 1 | LOTE 1 | $4.47 \times 10^3 \pm 6.79 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.57±0.01 | 0.51±0.01 | 0.52±0.01 | 0.46±0.01 |
| | | LOTE 2 | $4.21 \times 10^3 \pm 5.41 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.61±0.01 | 0.54±0.01 | 0.54±0.01 | 0.52±0.01 |
| | PROTOCOLO 4 | LOTE 1 | $5.25 \times 10^3 \pm 2.51 \times 10^4$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.48±0.02 | 0.42±0.02 | 0.44±0.02 | 0.42±0.02 |
| | | LOTE 2 | $5.12 \times 10^3 \pm 3.99 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.44±0.01 | 0.44±0.01 | 0.45±0.01 | 0.43±0.01 |

Tabla 4.11 Eficiencia para la señal TL total de las galletas del protocolo 1 (horneado completo, equipo lector A) y protocolo 4 (horneado sencillo, equipo lector A).

| | | $\eta = \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_P}{m_p} / \frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_T}{m_T}$ | | PROTONES | | | |
|--------|-------------|--|---|---|---|---|---|
| | | | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | | | | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| | | | | $5.75 \times 10^7 \pm 1.15 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $5.43 \times 10^7 \pm 5.60 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $6.64 \times 10^7 \pm 1.94 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $6.21 \times 10^7 \pm 2.08 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 2 | LOTE 1 | $1.58 \times 10^7 \pm 3.77 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.37±0.01 | 0.35±0.04 | 0.43±0.02 | 0.40±0.02 |
| | | LOTE 2 | $1.47 \times 10^7 \pm 3.21 \times 10^5$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.39±0.01 | 0.37±0.04 | 0.43±0.01 | 0.43±0.01 |
| | PROTOCOLO 3 | LOTE 1 | $1.21 \times 10^7 \pm 1.18 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.47±0.01 | 0.55±0.02 | 0.55±0.02 | 0.51±0.02 |
| | | LOTE 2 | $1.18 \times 10^7 \pm 3.04 \times 10^4$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.46±0.01 | 0.46±0.05 | 0.56±0.02 | 0.52±0.02 |

Tabla 4.12 Eficiencia para la señal TL total de las galletas del protocolo 2 (horneado sencillo, equipo lector B) y protocolo 3 (horneado completo, equipo lector B).

| | | $\frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_P}{m_p}$ / $\frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_\gamma}{m_\gamma}$ | PROTONES | |
|--------|-------------|---|---|---|
| | | | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 4 |
| | | | $2.17 \times 10^5 \pm 1.95 \times 10^4$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $2.51 \times 10^5 \pm 5.53 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 1 | $2.83 \times 10^5 \pm 9.08 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.76±0.08 | 0.89±0.04 |
| | PROTOCOLO 4 | $3.36 \times 10^5 \pm 7.81 \times 10^3$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.59±0.06 | 0.69±0.02 |

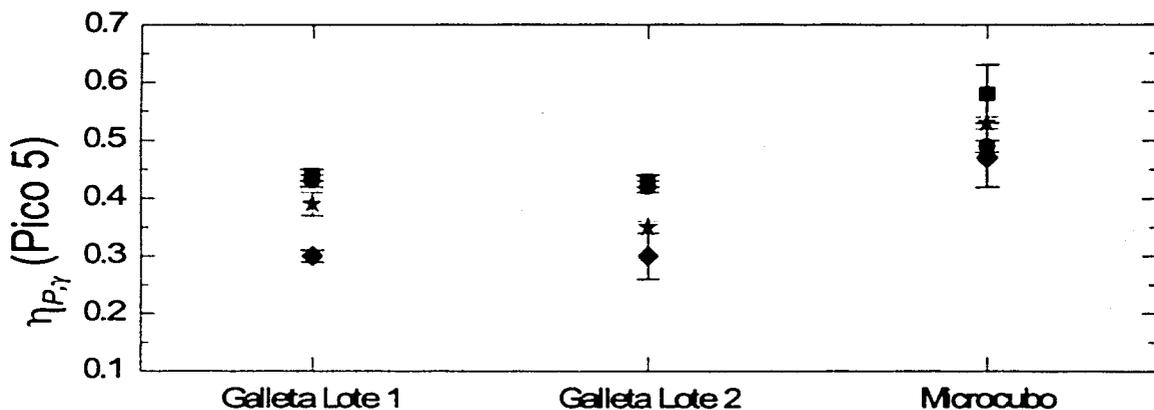
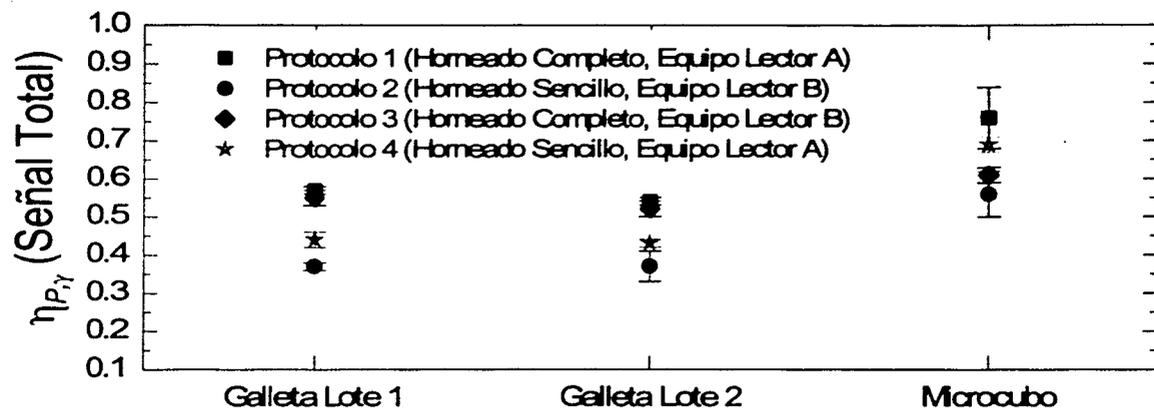
Tabla 4.13 Eficiencia para la señal total de los microcubos del protocolo 1 (horneado completo, equipo lector A) y protocolo 4 (horneado sencillo, equipo lector A).

| | | $\frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_P}{m_p}$ / $\frac{\left(\frac{STL}{D}\right)_\gamma}{m_\gamma}$ | PROTONES | |
|--------|-------------|---|---|---|
| | | | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 |
| | | | $6.73 \times 10^7 \pm 6.93 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | $6.31 \times 10^7 \pm 1.90 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) |
| GAMMAS | PROTOCOLO 2 | $1.04 \times 10^7 \pm 1.36 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.56±0.06 | 0.52±0.02 |
| | PROTOCOLO 3 | $1.20 \times 10^7 \pm 1.51 \times 10^6$ (nC g ⁻¹ Gy ⁻¹) | 0.65±0.07 | 0.61±0.02 |

Tabla 4.14 Eficiencia para la señal total de los microcubos del protocolo 2 (horneado sencillo, equipo lector B) y protocolo 3 (horneado completo, equipo lector B).

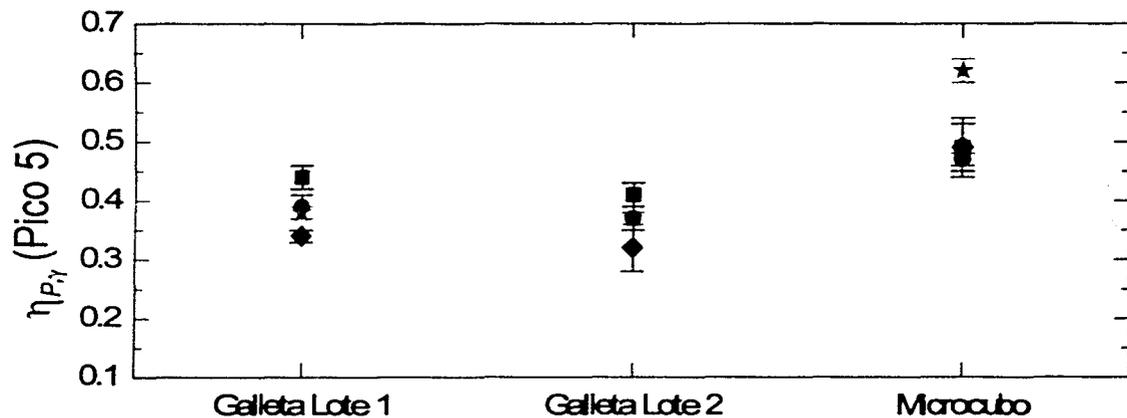
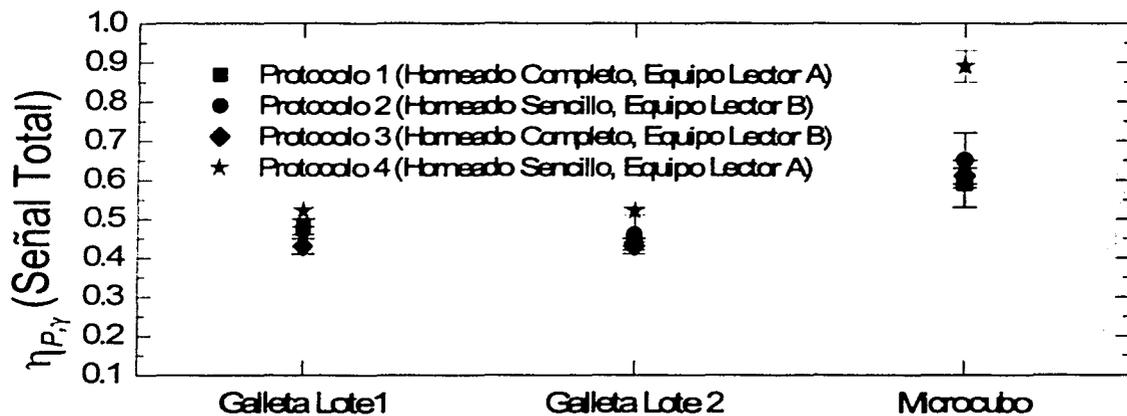
Las siguientes graficas 4.3 - 4.5 muestran los valores de $\eta_{p,\gamma}$ para los 4 protocolos de trabajo, se puede observar que los valores de $\eta_{p,\gamma}$ para pico 5 son relativamente mayores comparándolos con la señal total. También se puede observar la diferencia que existe entre las dos presentaciones (galletas y microcubos), siendo en todos los casos mayor para microcubos.

En el siguiente capítulo se discutirán en detalle todos los resultados de eficiencia.



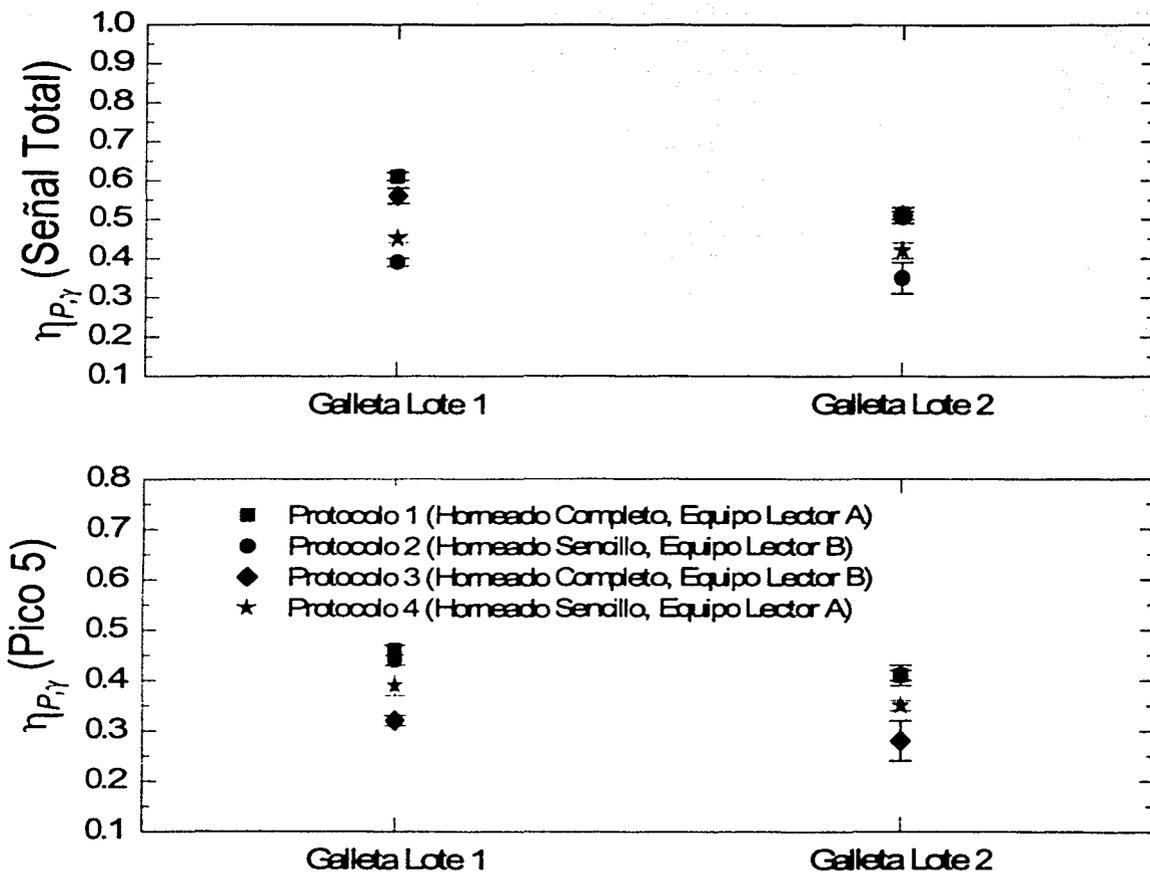
Presentación y lote del dosímetro TLD-100

Grafica 4.3 Eficiencia relativa termoluminiscente para los 4 protocolos conservando el mismo protocolo para protones y gammas.



Presentación y lote del dosímetro TLD-100

Grafica 4.4 Eficiencia relativa TL calculada introduciendo cambios de homeado en el denominador (gammas) para los 4 protocolos.



Presentación y lote del dosímetro TLD-100

Grafica 4.5 Eficiencia relativa TL calculada introduciendo cambios de lote en el denominador (gammas) para los 4 protocolos.

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo, se discute la distribución de la señal TL de los picos de la curva de brillo para cada protocolo de trabajo de los dosímetros expuestos a alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²). Se analizan los resultados de $\eta_{P,y}$ primeramente para el equipo lector A (UNAM), a continuación para el equipo lector B (ININ), y por último se comparan los resultados de $\eta_{P,y}$ entre los dos equipos.

5.1 DISTRIBUCIÓN DE LA SEÑAL TL EN LA CURVA DE BRILLO

Los dosímetros irradiados con alta fluencia de protones de 3 MeV nos permite observar la forma de la curva de brillo y notar si ésta presenta cambios ante la variación de distintos factores experimentales (ver figuras 4.1 y 4.2). Si observamos con detalle estas figuras podemos apreciar las siguientes diferencias:

1. Comparando las curvas que presentan el mismo horneado obtenidas usando distinto equipo lector (protocolo 1 vs 3, y protocolo 2 vs 4) vemos que en este caso la diferencia más notable es la caída al final de la curva a altas temperaturas, la cual es más extendida en el equipo lector B. Esto lleva a diferencias en los picos ajustados de alta temperatura.
2. Comparando ahora las curvas obtenidas en el mismo equipo pero con distinto horneado (protocolo 1 vs 4, y protocolo 2 vs 3), se observa claramente una menor contribución de los picos de baja temperatura para los protocolos 1 y 3. Este hecho se debe al efecto de estabilización de estos picos con el horneado completo. Por otro lado, se observan también aparentes diferencias en las proporciones de los picos de alta temperatura.

| PICO | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 4 | |
|-------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | LOTE 1 | LOTE 2 |
| 3 | 0.04 | 0.04 | 0.13 | 0.11 | 0.04 | 0.04 | 0.13 | 0.12 |
| 4 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 5 | 0.39 | 0.39 | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.38 | 0.40 | 0.39 |
| 6a | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.09 | 0.05 | 0.06 |
| 6b | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.06 |
| 7 | 0.18 | 0.18 | 0.13 | 0.14 | 0.16 | 0.16 | 0.14 | 0.15 |
| 8 | 0.09 | 0.09 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.07 |
| 9 | 0.07 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.05 |
| SENAL TOTAL | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Tabla 5.1 Galletas, señal TL para cada pico de la curva brillo normalizada por la señal total, para alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²).

| PICO | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 | PROTOCOLO 4 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3 | 0.03 | 0.09 | 0.03 | 0.10 |
| 4 | 0.07 | 0.10 | 0.06 | 0.11 |
| 5 | 0.44 | 0.48 | 0.47 | 0.45 |
| 6a | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.03 |
| 6b | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.05 |
| 7 | 0.19 | 0.13 | 0.18 | 0.14 |
| 8 | 0.12 | 0.07 | 0.10 | 0.08 |
| 9 | 0.06 | 0.03 | 0.06 | 0.04 |
| SENAL TOTAL | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Tabla 5.2 Microcubos, señal TL para cada pico de la curva brillo normalizada por la señal total, para alta fluencia de protones (1×10^{10} p/cm²).

Estas diferencias cualitativas se observan tanto para el caso de galletas como de microcubos. Se hizo un análisis cuantitativo normalizando la señal TL de cada pico entre la señal total, obteniendo la tablas 5.1 y 5.2.

De las tablas 5.1 referida a galletas, se puede observar que la diferencia que existe entre la señal obtenida usando distintos lotes es menor al 10% por lo que se considera correcto obtener un promedio para el cociente de cada pico a señal total. Esto se muestra en la tabla 5.3.

| PICO | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 | PROTOCOLO 4 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3 | 0,04 | 0,12 | 0,04 | 0,13 |
| 4 | 0,09 | 0,13 | 0,11 | 0,11 |
| 5 | 0,39 | 0,38 | 0,38 | 0,40 |
| 6a | 0,07 | 0,07 | 0,09 | 0,06 |
| 6b | 0,07 | 0,05 | 0,07 | 0,06 |
| 7 | 0,18 | 0,14 | 0,16 | 0,15 |
| 8 | 0,09 | 0,06 | 0,07 | 0,07 |
| 9 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,05 |
| SEÑAL TOTAL | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Tabla 5.3 Galletas, cociente promedio (2 lotes) para cada pico de la curva brillo normalizada por la señal total, alta fluencia.

Se consideran tres regiones en la curva de brillo que son:

1. Región de picos de baja temperatura (PBT), integrada por los picos 3 y 4.
2. Región de pico 5 (P5), únicamente.
3. Región de picos de alta temperatura (PAT), integrada por los picos 6a, 6b, 7 8 y 9.

Al comparar los protocolos 1 y 3 y los protocolos 2 y 4 en las tablas 5.2 y 5.3 se observa que las diferencias en la señal TL entre ambos equipos son del orden del 5%. Se considera correcto promediar el cociente de cada región con respecto a la señal total para los pares de protocolos correspondientes a cada equipo y se obtiene la tabla 5.4.

| REGION | PROTOCOLO 1-3 (HORNEADO COMPLETO) | PROTOCOLO 2-4 (HORNEADO SIMPLE) |
|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| GALLETAS | | |
| PBT/ST | 0,13 | 0,25 |
| P5/ST | 0,39 | 0,39 |
| PAT/ST | 0,48 | 0,36 |
| MICROCUBOS | | |
| PBT/ST | 0,10 | 0,20 |
| P5/ST | 0,46 | 0,47 |
| PAT/ST | 0,44 | 0,33 |

Tabla 5.4 Distribución de la señal TL relativa, por regiones, normalizada a la señal total ST.

De estos resultados se observa que la contribución pico 5 entre la señal total se preserva al cambiar horneado, y que es del orden del 8% mayor para microcubos que para galletas. La contribución relativa PBT entre señal total es del orden del 11% mayor para el horneado simple con respecto al horneado completo y la contribución relativa PAT entre señal total también es un 11% mayor para el horneado completo con respecto al horneado simple, para las dos presentaciones. Esto quiere decir que la ganancia en la señal TL que se lleva el horneado simple en los picos de baja temperatura la pierde en sus picos de alta temperatura y, viceversa, para el horneado completo al compararse entre sí. Al comparar los protocolos 1 y 3, y los protocolos 2 y 4 en las tablas 5.1 y 5.2 se observa que las diferencias en la señal TL al utilizar un equipo u otro son del orden del 5%. Las contribuciones relativas PBT entre señal total y PAT entre señal total ante cambio de horneado se preservan al cambiar la presentación.

5.2 EFICIENCIA EN EL EQUIPO LECTOR UNAM

Observando los valores de la eficiencia de las tablas 4.7, 4.9, 4.11 y 4.13 se puede ver que los valores para el pico 5 están dentro del intervalo [0.35, 0.62] teniéndose un valor promedio de 0.43 ± 0.07 mientras que para la señal total los valores caen dentro del

intervalo [0.42, 0.89] con un promedio igual a 0.54 ± 0.12 , tomando en cuenta todos los factores experimentales estudiados.

Si consideramos los resultados generales al medir η con los distintos protocolos globales, conservando el mismo protocolo para protones y gammas, podemos observar las diferencias que se obtienen en el valor de la eficiencia relativa TL al cambiar la presentación del dosímetro; esta se muestra en la tabla 5.5. Se puede observar que estas diferencias están en el intervalo [24%, 44%].

| | PICO 5 | | | | SEÑAL TOTAL | | | |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 |
| GALLETA | 0.44 | 0.43 | 0.39 | 0.35 | 0.57 | 0.54 | 0.44 | 0.43 |
| MICROCUBO | 0.58 | | 0.53 | | 0.76 | | 0.77 | |
| COCIENTE (GALLETA/MICROCUBO) | 0.76 | 0.74 | 0.73 | 0.66 | 0.75 | 0.71 | 0.57 | 0.56 |
| DIFERENCIA (%) | 24 | 26 | 27 | 34 | 25 | 29 | 43 | 44 |

Tabla 5.5 Valores de eficiencia, y su comparación al cambiar la presentación de los dosímetros para cada protocolo. Estos valores provienen de las tablas 4.7, 4.9, 4.11 y 4.13. Aquí se conserva el protocolo al evaluar la eficiencia.

La contribución del pico 5 respecto de la señal total está asociada al tipo de horneado utilizado en la medición de la eficiencia relativa TL; ver tabla 5.6. En esta tabla se puede observar que el cociente es mayor para el horneado simple con respecto al horneado completo, sin depender de la presentación del dosímetro; lo que implica una dependencia del horneado.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|--------------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 4 |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| PICO 5 | 0.44 | 0.43 | 0.39 | 0.35 | 0.58 | 0.53 |
| SEÑAL TOTAL | 0.57 | 0.54 | 0.44 | 0.43 | 0.76 | 0.77 |
| COCIENTE | 0.77 | 0.80 | 0.89 | 0.81 | 0.76 | 0.77 |

Tabla 5.6 Cociente del pico 5 entre la señal total. Los valores de pico 5 y señal total provienen de las tablas 4.7, 4.9, 4.11 y 4.13.

Las tablas C.1 a C.6 del apéndice C muestran la comparación entre los valores de la eficiencia relativa TL para el equipo A respetando el mismo protocolo en numerador y denominador y aquellos en que se ha cambiado algún factor en la medida ante irradiación gamma (denominador de la ecuación 1.2) utilizando distinto horneado o distinto lote o ambos.

Si se consideran las diferencias máximas observadas, ante el cambio de un factor en el protocolo de trabajo experimental, para medir la eficiencia relativa TL de acuerdo a los resultados de las tablas C.1 a C.6, se obtiene la tabla 5.7:

| FACTOR | DIFERENCIAS AL CAMBIAR EL FACTOR (%) | | | |
|------------------------|--------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | GALLETAS | | MICROCUBOS | |
| | PICO 5 | SEÑAL TOTAL | PICO 5 | SEÑAL TOTAL |
| HORNEADO | 10 | 23 | 18 | 29 |
| LOTE | 5 | 7 | | |
| HORNEADO Y LOTE | 5 | 23 | | |

Tabla 5.7 Máxima diferencia que se obtiene al cambiar un factor en el protocolo que se utiliza para medir la eficiencia. Estos valores provienen de las tablas C.1 a C.6 del apéndice C.

5.3 EFICIENCIA EN EL EQUIPO LECTOR ININ

Procediendo de la misma manera que en la sección anterior, podemos observar los valores de la eficiencia de las tablas 4.8, 4.10, 4.12 y 4.14. Se puede ver que los valores para el pico 5 están dentro del intervalo [0.28, 0.49] y tienen un valor promedio de 0.39 ± 0.07 . Para la señal total se obtienen valores dentro del intervalo [0.35, 0.65] y con un promedio igual 0.48 ± 0.08 , tomando en cuenta todos los factores experimentales estudiados.

Nuevamente, considerando los resultados generales al medir η con los distintos protocolos globales conservando el mismo protocolo para protones y gammas, podemos observar la diferencia que se obtiene en el valor de la eficiencia relativa TL al cambiar la presentación del dosímetro. Ésta se muestra en la tabla 5.8. Se pueden observar diferencias en el intervalo [12%, 36%].

| | PICO 5 | | | | SEÑAL TOTAL | | | |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 |
| GALLETA | 0.30 | 0.30 | 0.43 | 0.42 | 0.37 | 0.37 | 0.55 | 0.52 |
| MICROCUBO | 0.47 | | 0.49 | | 0.56 | | 0.61 | |
| COCIENTE (GALLETA/MICROCUBO) | 0.64 | 0.64 | 0.88 | 0.86 | 0.66 | 0.66 | 0.90 | 0.85 |
| DIFERENCIA (%) | 36 | 36 | 12 | 14 | 34 | 34 | 10 | 15 |

Tabla 5.8 Valores de eficiencia, y su comparación al cambiar la presentación de los dosímetros para cada protocolo. Estos valores provienen de la tablas 4.8, 4.10, 4.12 y 4.14.

La contribución del pico 5 respecto de la señal total está asociado al tipo de horneado utilizado en la medición de la eficiencia relativa TL; ver tabla 5.9. En esta tabla, se observa que el cociente es mayor para el horneado simple con respecto al horneado completo sin depender de la presentación del dosímetro, lo que implica una dependencia del horneado.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|--------------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| PICO 5 | 0.30 | 0.30 | 0.43 | 0.42 | 0.47 | 0.49 |
| SEÑAL TOTAL | 0.37 | 0.37 | 0.55 | 0.52 | 0.56 | 0.61 |
| COCIENTE | 0.81 | 0.81 | 0.78 | 0.81 | 0.84 | 0.80 |

Tabla 5.9 Cociente del pico 5 entre la señal total. Los valores de pico 5 y señal total provienen de las tablas 4.7, 4.9, 4.11 y 4.13.

Las tablas C.7 a C.12 muestran la comparación entre los valores de la eficiencia relativa TL respetando el protocolo en numerador y denominador, y aquellos en que se ha cambiado factores en la medida ante irradiación gamma (denominador en la ecuación 1.2) utilizando distinto horneado o distinto lote, o ambos.

Si se consideran las diferencias máximas, observadas ante el cambio de un factor en el protocolo de trabajo experimental para medir la eficiencia relativa TL de acuerdo a los resultados las tablas C.7 a C.12, se obtiene la tabla 5.10:

| FACTOR | DIFERENCIAS AL CAMBIAR EL FACTOR (%) | | | |
|------------------------|--------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | GALLETAS | | MICROCUBOS | |
| | PICO 5 | SEÑAL TOTAL | PICO 5 | SEÑAL TOTAL |
| HORNEADO | 12 | 28 | 4 | 17 |
| LOTE | 6 | 6 | | |
| HORNEADO Y LOTE | 14 | 30 | | |

Tabla 5.10 Máxima diferencia que se obtiene al cambiar un factor en el protocolo que se utiliza para medir la eficiencia relativa TL. Estos valores provienen de las tablas C.7 a C.12 del apéndice C.

5.4 EFICIENCIA (CONSIDERACIONES FINALES)

En esta sección se presentan los resultados globales y la comparación entre los valores de $\eta_{P,\gamma}$ obtenidos usando los dos equipos lectores.

Las diferencias entre un equipo y otro, conservando el mismo protocolo para numerador y denominador de la ecuación 1.2, para el pico 5 y la señal total, se muestran en las tablas 5.12 y 5.13.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|-----------------------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|-----------------|
| | HORNEADO COMPLETO | | HORNEADO SIMPLE | | HORNEADO COMPLETO | HORNEADO SIMPLE |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| UNAM | 0.44 | 0.43 | 0.39 | 0.35 | 0.58 | 0.53 |
| ININ | 0.43 | 0.42 | 0.30 | 0.30 | 0.49 | 0.47 |
| COCIENTE | 1.02 | 1.02 | 1.30 | 1.17 | 1.18 | 1.13 |
| DIFERENCIA (%) | 2 | 2 | 30 | 17 | 18 | 13 |

Tabla 5.12 Diferencia entre los valores de la eficiencia de los equipos A y B, para el pico 5.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|-----------------------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|-----------------|
| | HORNEADO COMPLETO | | HORNEADO SIMPLE | | HORNEADO COMPLETO | HORNEADO SIMPLE |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| UNAM | 0.57 | 0.54 | 0.44 | 0.43 | 0.76 | 0.69 |
| ININ | 0.55 | 0.52 | 0.37 | 0.37 | 0.61 | 0.56 |
| COCIENTE | 1.04 | 1.04 | 1.19 | 1.16 | 1.25 | 1.23 |
| DIFERENCIA (%) | 4 | 4 | 19 | 16 | 25 | 23 |

Tabla 5.13 Diferencia entre los valores de la eficiencia de los equipos A y B, para la señal total.

Al observar detenidamente los valores de las tablas 5.12 y 5.13, se pueden ver que las diferencias porcentuales, en general, en la eficiencia relativa TL. Al cambiar de equipo son menores para las galletas que para los microcubos; son menores para el pico 5 que para la señal total, y en particular, se observa claramente que para las galletas es mucho menor

cuando se utiliza el horneado completo. Es decir, cuando a los dosímetros se les aplicaron los protocolos 1 y 3. Las máximas diferencias que se tienen al cambiar el equipo se muestran en la siguiente tabla:

| DIFERENCIAS AL CAMBIAR EL EQUIPO (%) | | | |
|---|--------------------|-------------------|--------------------|
| GALLETAS | | MICROCUBOS | |
| PICO 5 | SEÑAL TOTAL | PICO 5 | SEÑAL TOTAL |
| 30 | 18 | 19 | 25 |

Tabla 5.14 Porcentaje de diferencia máxima entre los valores de la eficiencia obtenidos utilizando los equipos A y B, para la señal total. Estos valores provienen de las tablas 5.12 y 5.13.

La siguiente tabla muestra la fusión de las tablas 5.7 y 5.10, así como de las diferencias que se obtiene al cambiar de equipo lector.

| FACTOR | DIFERENCIAS AL CAMBIAR EL FACTOR (%) | | | |
|------------------------|---|--------------------|---------------|--------------------|
| | UNAM | | ININ | |
| | PICO 5 | SEÑAL TOTAL | PICO 5 | SEÑAL TOTAL |
| HORNEADO | 10 | 23 | 12 | 28 |
| LOTE | 5 | 7 | 6 | 6 |
| HORNEADO Y LOTE | 5 | 23 | 14 | 30 |

Tabla 5.15 Porcentaje de diferencia que se obtiene al cambiar un factor experimental en el protocolo que se utiliza para medir la eficiencia para Galletas. Estos valores provienen de las tablas 5.7 y 5.10.

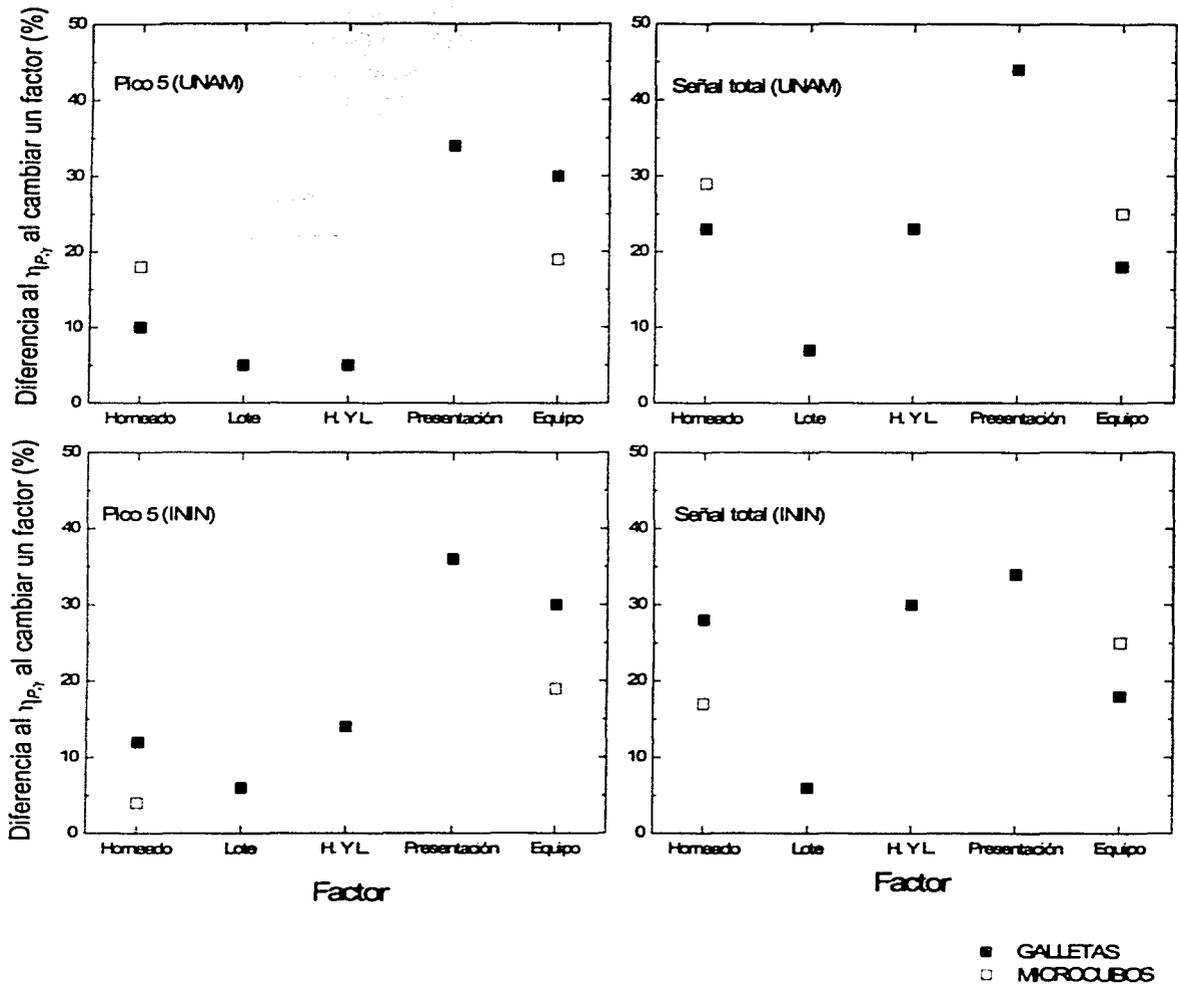
Las diferencias que se obtienen al cambiar el horneado en los microcubos son en la UNAM de 18% y 29%, y en el ININ, 4% y 17%, para pico 5 y señal total respectivamente.

Las diferencias máximas que se obtienen al cambiar la presentación de los dosímetros se muestra en la siguiente tabla.

| DIFERENCIAS AL CAMBIAR LA PRESENTACION (%) | | | |
|---|--------------------|---------------|--------------------|
| UNAM | | ININ | |
| PICO 5 | SEÑAL TOTAL | PICO 5 | SEÑAL TOTAL |
| 34 | 44 | 36 | 34 |

Tabla 5.16 Porcentaje máximo de diferencia que se obtiene al cambiar la presentación de los dosímetros al medir la eficiencia. Estos valores provienen de las tablas 5.5 y 5.8.

Las diferencias entre los valores de la eficiencia tanto para el equipo A (UNAM) como para el equipo B (ININ) son congruentes, ya que los porcentajes son del mismo orden en magnitud; ver la tablas anteriores y la grafica 5.1.



Grafica 5.1 Porcentaje de diferencia en el valor de la eficiencia TL relativa al cambiar un factor experimental en el denominador de la ecuación 1.2, para pico 5 y señal total en los dos equipos utilizados.

6 CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

Utilizar distintos protocolos generales de trabajo para medir la eficiencia relativa termoluminiscente pero manteniendo el mismo protocolo para medir respuesta TL ante radiación con protones y ante radiación gamma, conduce a un intervalo muy amplio de valores de $\eta_{P,\gamma}$ que muestra diferencias hasta de un 50%. La diferencia más notable ocurre en el uso de distintas presentaciones, observando valores de $\eta_{P,\gamma}$ mayores para microcubos que para galletas. Al final de esta sección se discute este resultado con mayor detalle.

Si se usa la misma presentación el intervalo de valores de eficiencia conduce a diferencias del orden de 30% para galletas y 20% para microcubos.

El efecto de combinar distinto protocolo experimental para la obtención del numerador (protones) y denominador (gammas) en la medida de eficiencias conduce a diferencias cuantitativas que dependen del factor experimental variado.

De manera general, los resultados que se observan al cambiar algún factor en el denominador indican lo siguiente:

- la diferencia porcentual en $\eta_{P,\gamma}$ es menor para el pico 5 que para la señal total.
- la variación en el lote produce diferencias porcentuales menores que la variación en el tratamiento térmico
- una variación conjunta de lote y homeado produce mayor diferencia porcentual que variaciones individuales de cada factor experimental.

- Los resultados son consistentes en los dos equipos utilizados.

Los resultados observados en relación al cambio de horneado, se derivan de la dependencia de la forma de la curva de brillo con el tipo de horneado, a partir de la cual se concluye:

- La contribución de pico 5 no cambia al usar distinto horneado.
- Se tiene mayor contribución relativa de picos de alta temperatura respecto de pico 5 al utilizar el horneado completo.
- El cociente de pico 5 respecto a señal total es mayor al usar horneado simple independiente tanto de la presentación como del equipo utilizado.

Por último, se hace énfasis en la diferencia más significativa observada que se tiene al comparar los valores de eficiencia TL relativa utilizando distinta presentación. Estos resultados conducen a eficiencias TL relativas entre 36 y 44% mayores para microcubos respecto de galletas. Estas diferencias se han atribuido a diferente sensibilidad de microcubos respecto de galletas ante irradiación gamma (Av98b); y estudios recientes (Ro02) muestran que estas discrepancias pueden estar asociadas con factores que intervienen en la recolección de la luz por el equipo lector termoluminiscente. Estos factores son la reflexión de la luz emitida por el dosímetro en la plancheta y la emisión de luz por las caras laterales de los dosímetros dado que el ángulo sólido subtendido por las caras laterales de los microcubos sobre el tubo fotomultiplicador es mayor con respecto al que subtienden las galletas.

Finalmente se puede decir que la principal conclusión de este trabajo es que, para obtener valores confiables de eficiencia termoluminiscente relativa de partículas cargadas pesadas respecto de radiación gamma ($\eta_{PCP,\gamma}$), se debe utilizar siempre el mismo protocolo de trabajo (presentación y lote, horneado y lectura) al medir la respuesta ante partículas cargadas pesadas y ante radiación gamma. Al reportar resultados de $\eta_{P,\gamma}$ los autores deben dar a conocer con detalle el protocolo utilizado y aquello que consideren relevante en la aplicación del mismo.

APÉNDICE A

La propagación de la incertidumbre de una función de varias variables f está dada por (BE 92):

$$u^2(f) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{df}{dx_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (\text{A.1})$$

donde $u(f)$ es la incertidumbre de la función y $u(x_i)$ es la incertidumbre de la variable x_i .

INCERTIDUMBRE DE LA FLUENCIA

La fluencia $\phi(\theta_{\text{TLD}})$, sobre los dosímetros TL está dada por la ecuación (3.6):

$$\phi(\theta_{\text{TLD}}) = N(\theta_{\text{DBS}}) \frac{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{\text{DBS}}}{2}\right)}{\text{sen}^4\left(\frac{\theta_{\text{TLD}}}{2}\right)} \frac{1}{\pi r_{\text{DBS}}^2} \left(\frac{R_{\text{DBS}}}{R_{\text{TLD}}}\right)^2 \quad (\text{3.6})$$

Esta relación incluye explícitamente la dependencia de las variables medidas, y resulta independiente del área del dosímetro.

Aplicando la ecuación (A.1) a la ecuación anterior se obtiene la incertidumbre de la fluencia, $u(\phi_{\text{TLD}})$.

$$\begin{aligned} u^2(\phi_{\text{TLD}}) = & \left[\frac{d\phi_{\text{TLD}}}{dN_{\text{DBS}}} \right]^2 u^2(N_{\text{DBS}}) + \left[\frac{d\phi_{\text{TLD}}}{dR_{\text{DBS}}^2} \right]^2 u^2(R_{\text{DBS}}) + \\ & \left[\frac{d\phi_{\text{TLD}}}{dR_{\text{TLD}}^2} \right]^2 u^2(R_{\text{TLD}}) + \left[\frac{d\phi_{\text{TLD}}}{dr_{\text{DBS}}^2} \right]^2 u^2(r_{\text{DBS}}) + \\ & \left[\frac{d\phi_{\text{TLD}}}{d\theta_{\text{DBS}}} \right]^2 u^2(\theta_{\text{DBS}}) + \left[\frac{d\phi_{\text{TLD}}}{d\theta_{\text{TLD}}} \right]^2 u^2(\theta_{\text{TLD}}) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

realizando los cálculos de las derivadas y dividiendo entre la fluencia, se tiene la incertidumbre relativa igual a:

$$\begin{aligned} \left[\frac{u(\phi_{TLD})}{\phi_{TLD}} \right]^2 = & \left[\frac{u(N_{DBS})}{N_{DBS}} \right]^2 + \left[\frac{2u(R_{DBS})}{R_{DBS}} \right]^2 + \\ & \left[\frac{2u(R_{TLD})}{R_{TLD}} \right]^2 + \left[\frac{2u(r_{DBS})}{r_{DBS}} \right]^2 + \\ & \left[\frac{2 \cos\left(\frac{\theta_{DBS}}{2}\right) u(\theta_{DBS})}{\text{sen}\left(\frac{\theta_{DBS}}{2}\right)} \right]^2 + \\ & \left[\frac{2 \cos\left(\frac{\theta_{TLD}}{2}\right) u(\theta_{TLD})}{\text{sen}\left(\frac{\theta_{TLD}}{2}\right)} \right]^2 \end{aligned}$$

INCERTIDUMBRE DEL RADIO R_{TLD} Y EL ÁNGULO θ_{TLD}

El radio R_{TLD} y el ángulo θ_{TLD} están dados por

$$R_{TLD} = \sqrt{(r_{BT})^2 + (r_T)^2} \quad (\text{A.3})$$

$$\theta_{TLD} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{r_T}{r_{BT}} \right) \quad (\text{A.4})$$

en donde r_T es el radio del túnel y r_{BT} es la distancia entre el túnel y el blanco.

Aplicando la ecuación (A.1) a las ecuaciones anteriores y haciendo las operaciones se obtiene:

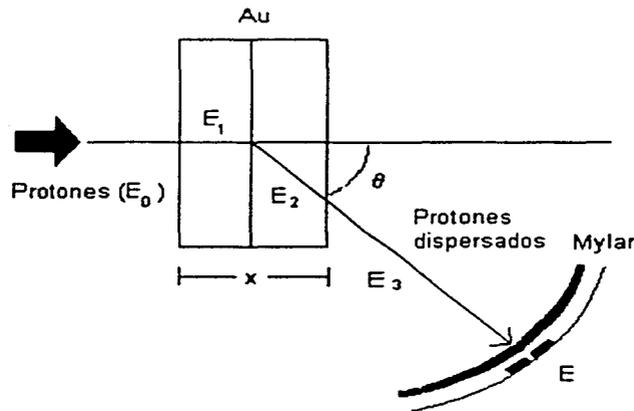
$$u^2(\theta_{TLD}) = \frac{r_{BT}^2 u^2(r_T) + r_T u^2(r_{BT})}{(r_{BT}^2 + r_T^2)^2} \quad (\text{A.5})$$

$$u^2(R_{TLD}) = u^2(r_T) + u^2(r_{BT}) \quad (\text{A.6})$$

APÉNDICE B

PÉRDIDA DE ENERGÍA DEL HAZ DE PROTONES EN EL BLANCO.

Para calcular la pérdida de energía del haz de protones, suponemos que la dispersión del haz ocurre en un punto ubicado a la mitad del espesor del blanco. El protón dispersado es emitido a un ángulo θ , viajando cierta distancia dentro del blanco y perdiendo una parte de su energía, que depende del ángulo de dispersión. En la siguiente figura se muestra el esquema:



El cálculo para realizar la corrección de la energía E_0 es:

1. Pérdida de energía del haz de protones al atravesar la mitad del espesor del blanco: $\Delta E = (dE/dx)_{Au} x/2$.

$$E_1 = E_0 - (dE/dx)_{Au} x/2$$

2. Cálculo cinemático (conservación del momento lineal) de la energía del protón dispersado. Para este cálculo consideramos que la colisión entre los núcleos de Au y los protones es elástica, entonces el factor cinemático está dado por:

$$K = \left\{ \frac{(m_{Au}^2 + m_p^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + m_p \cos \theta}{m_p + m_{Au}} \right\}^2$$

donde m_p y m_{Au} son las masa del protón y el oro respectivamente, y θ es el ángulo de dispersión del protón.

En el centro del blanco la energía de los protones al interaccionar con el blanco de oro está dada por:

$$E_2 = K E_1$$

3. Pérdida de energía del protón dispersado al atravesar la segunda mitad del blanco según su ángulo de dispersión (igual al ángulo θ en que se encuentra el dosímetro): $\Delta E = (dE/dx)_{Au}(x/2 \cos \theta)$. Así se obtiene la energía E_3 dada por:

$$E_3 = E_2 - (dE/dx)(x/2 \cos \theta)$$

4. Pérdida de energía del protón dispersado al atravesar el mylar que sostiene al dosímetro $\Delta E = (dE/dz)_{mylar} z$. Finalmente la energía que incide en el dosímetro dada por:

$$E = E_3 - (dE/dz)_{mylar} z$$

donde z es el espesor del mylar.

APÉNDICE C

EFICIENCIA EN EL EQUIPO LECTOR UNAM

Las tablas C.1 a C.6 muestran la comparación entre los valores de la eficiencia relativa TL para el equipo A, respetando el mismo protocolo en numerador y denominador, y aquellos en que se ha cambiado algún factor en la medida ante irradiación gamma (denominador de la ecuación 1.2) utilizando distinto horneado o distinto lote, o ambos.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|---|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 4 |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| EFICIENCIA | 0.57 | 0.54 | 0.44 | 0.43 | 0.76 | 0.69 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO | 0.48 | 0.44 | 0.52 | 0.52 | 0.59 | 0.89 |
| COCIENTE | 1.19 | 1.23 | 0.85 | 0.83 | 1.29 | 0.78 |
| DIFERENCIA (%) | 19 | 23 | 15 | 17 | 29 | 22 |

Tabla C.1 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de horneado en el denominador, Pico 5. Estos valores provienen de las tablas 4.7 y 4.9.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|---|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | | PROTOCOLO 1 | PROTOCOLO 4 |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| EFICIENCIA | 0.44 | 0.43 | 0.39 | 0.35 | 0.58 | 0.53 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO | 0.44 | 0.41 | 0.38 | 0.39 | 0.49 | 0.62 |
| COCIENTE | 1.00 | 1.05 | 1.03 | 0.90 | 1.18 | 0.85 |
| DIFERENCIA (%) | 0 | 5 | 3 | 10 | 18 | 15 |

Tabla C.2 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de homeado en el denominador, Señal total. Estos valores provienen de las tablas 4.11 y 4.13.

| | GALLETAS | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------|-------------|--------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | LOTE1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.44 | 0.43 | 0.39 | 0.35 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE LOTE | 0.46 | 0.41 | 0.39 | 0.35 |
| COCIENTE | 0.96 | 1.05 | 1.00 | 1.00 |
| DIFERENCIA (%) | 4 | 5 | 0 | 0 |

Tabla C.3 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de lote en el denominador, Pico 5. Estos valores provienen de la tabla 4.7.

| | GALLETAS | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------|-------------|--------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | LOTE1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.57 | 0.54 | 0.44 | 0.43 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE LOTE | 0.61 | 0.51 | 0.45 | 0.42 |
| COCIENTE | 0.93 | 1.06 | 0.98 | 1.02 |
| DIFERENCIA (%) | 7 | 6 | 2 | 2 |

Tabla C.4 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de lote en el denominador, Señal total. Estos valores provienen de la tabla 4.11.

| | GALLETAS | | | |
|--|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | LOTE1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.44 | 0.43 | 0.39 | 0.35 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO Y LOTE | 0.44 | 0.41 | 0.41 | 0.35 |
| COCIENTE | 1.00 | 1.05 | 0.95 | 1.00 |
| DIFERENCIA (%) | 0 | 5 | 5 | 0 |

Tabla C.5 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de horneado y el lote en el denominador. Pico 5. Estos valores provienen de la tabla 4.7.

| | GALLETAS | | | |
|--|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | PROTOCOLO 1 | | PROTOCOLO 4 | |
| | LOTE1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.57 | 0.54 | 0.44 | 0.43 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO Y LOTE | 0.50 | 0.44 | 0.55 | 0.49 |
| COCIENTE | 1.14 | 1.23 | 0.80 | 0.88 |
| DIFERENCIA (%) | 14 | 23 | 20 | 12 |

Tabla C.6 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de horneado y lote en el denominador, Señal total. Estos valores provienen de la tabla 4.11.

EFICIENCIA EN EL EQUIPO LECTOR ININ

Las tablas C.7 a C.12 muestran la comparación entre los valores de la eficiencia relativa TL para el equipo B, respetando el mismo protocolo en numerador y denominador y aquellos en que se ha cambiado algún factor en la medida ante irradiación gamma (denominador de la ecuación 1.2) utilizando distinto horneado o distinto lote, o ambos.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|---|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| EFICIENCIA | 0.30 | 0.30 | 0.43 | 0.42 | 0.47 | 0.49 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO | 0.34 | 0.32 | 0.39 | 0.40 | 0.49 | 0.47 |
| COCIENTE | 0.88 | 0.94 | 1.10 | 1.05 | 0.96 | 1.04 |
| DIFERENCIA (%) | 12 | 6 | 10 | 5 | 4 | 4 |

Tabla C.7 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante cambio de horneado en el denominador, Pico 5. estos valores provienen de las tablas 4.8 y 4.10.

| | GALLETAS | | | | MICROCUBOS | |
|---|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | | PROTOCOLO 2 | PROTOCOLO 3 |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 | | |
| EFICIENCIA | 0.37 | 0.37 | 0.55 | 0.52 | 0.56 | 0.61 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO | 0.47 | 0.46 | 0.43 | 0.43 | 0.65 | 0.52 |
| COCIENTE | 0.79 | 0.80 | 1.28 | 1.21 | 0.86 | 1.17 |
| DIFERENCIA (%) | 21 | 20 | 28 | 21 | 14 | 17 |

Tabla C.8 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de horneado en el denominador, Señal total. Estos valores provienen de las tablas 4.12 y 4.14.

| | GALLETAS | | | |
|---------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.30 | 0.30 | 0.43 | 0.42 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE LOTE | 0.32 | 0.31 | 0.41 | 0.37 |
| COCIENTE | 0.94 | 0.97 | 1.05 | 1.14 |
| DIFERENCIA (%) | 6 | 3 | 5 | 14 |

Tabla C.9 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de lote en el denominador, Pico 5. Estos valores provienen de la tabla 4.8.

| | GALLETAS | | | |
|---------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.37 | 0.37 | 0.55 | 0.52 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE LOTE | 0.39 | 0.35 | 0.56 | 0.51 |
| COCIENTE | 0.95 | 1.06 | 0.98 | 1.02 |
| DIFERENCIA (%) | 5 | 6 | 2 | 2 |

Tabla C.10 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de lote en el denominador, Señal total. Estos valores provienen de la tabla 4.12.

| | GALLETAS | | | |
|--|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.30 | 0.30 | 0.43 | 0.42 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO Y LOTE | 0.34 | 0.31 | 0.41 | 0.37 |
| COCIENTE | 0.88 | 0.97 | 1.05 | 1.14 |
| DIFERENCIA (%) | 12 | 3 | 5 | 14 |

Tabla C.11 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de horneado y lote en el denominador, Pico 5. Estos valores provienen de la tabla 4.8.

| | GALLETAS | | | |
|--|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | PROTOCOLO 2 | | PROTOCOLO 3 | |
| | LOTE 1 | LOTE 2 | LOTE 1 | LOTE 2 |
| EFICIENCIA | 0.37 | 0.37 | 0.55 | 0.52 |
| EFICIENCIA ANTE CAMBIO DE HORNEADO Y LOTE | 0.48 | 0.44 | 0.45 | 0.40 |
| COCIENTE | 0.77 | 0.84 | 1.22 | 1.30 |
| DIFERENCIA (%) | 23 | 16 | 22 | 30 |

Tabla C.12 Diferencia de los valores de eficiencia relativa TL ante el cambio de horneado y lote en el denominador, Señal total. Estos valores provienen de la tabla 4.12.

BIBLIOGRAFÍA

[At 75] Attix, Frank Herbert, "Further consideration of the track – interaction model for thermoluminescence in LiF (TLD-100)". J. Appl. Phys. 46:81 (1975).

[At 86] Attix, Frank Herbert. "Introduction to radiological physics and radiation dosimetry". John Wiley & Sons, N.Y. (1986).

[Av 98a] Aviles, P., Gamboa-deBuen, I., Rodríguez-Villafuerte, M., Buenfil, A. E., Ruiz, C.G., López, K. and Brandan, M. E., 1998, "Proc. II Mexican Symp. Medical Physics", México City, AIP. Eds., M. E. Brandan, G. Herrera-Corral and Ortega-Martinez, (1998).

[Av 98b] Aviles, Mandujano Patricia R., "Respuesta termoluminiscente de LiF:Ti, Mg irradiado con protones de 1.5 y 3 MeV", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM (1998).

[Av 99] Aviles P., Gamboa deBuen I., Rodríguez-Villafuerte M., Buenfil A. E., Ruiz-Trejo C., López K. And Brandan M. E. "Thermoluminescent response of TLD-100 to low energy protons", Radiat. Prot. Dosim. **84**, 1-4, 83-86 (1999).

[Av 00] Ávila, Aguirre Olga, "Depósito de energía en LiF ante irradiación con partículas cargadas pesadas y su relación con la respuesta termoluminiscente del material", Tesis de Doctorado en Ciencias (Física de Materiales), CICESE (2000).

[Be 73] Becker, Klaus., "Solid state dosimetry", CRC PRESS (1973).

[Be 92] Bevington P. R., Rovinson D. K., "Data deduction and error analysis for the physical science", McGraw-Hill N. Y. (1992).

[Bu 87] Buenfil, A. E., M. Uribe, A. de la Piedad, W. L. McLaughlin and A. Millar, "Thin plastic radiochromic dye films as ionizing radiation dosimeter". Radiat. Phys. Chem. 22, 325 (1985).

[Ca 94] Carrillo, R. E., Pearson, D. W., DeLuca, Jr. P. M. And Mackay, J. F. and Lagally, M. G., 1994, "Response of thermoluminescent lithium fluoride (TLD-100) to photon beams of 275, 400, 500, 600, 730, 900, 1200, 1550 and 2550 eV", Phys. Med. Biol. 39, 1875 (1994).

[Cl 68] Claffy, E. W., C. C. Klick y F. H. Attix, « Proc. Int. Conf. Luminescence Dosim.», AEC-CONF 680920, 302 (1968).

[Fr 66] Fricke, H. and Hart, E. J., "Chemical dosimetry, in Radiation dosimetry", Vol. II (F. H. Attix and W. C. Roesch, eds.), Academic Press, New York (1966).

[Ga 96a] Gamboa-deBuen, I. And Brandan M. E. "Influence of Annealing on TLD-100 Response to 5.3 MeV α -Particles", Appl. Radiat. Isot. 47, 111 (1996).

[Ga 96b] Gamboa-deBuen, Ma. Isabel. "Medida de la respuesta termoluminiscente (eficiencia y supralinealidad) de LiF:Mg,Ti expuesto a radiación altamente ionizante". Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM (1996).

[Ga 96c] Gamboa-deBuen, I., Buenfil, A. E., Rodriguez-Villafuerte, M., C. G., Zarate-Morales, A. and Brandan, M. E., "Supralinearity in the Response of TLD-100 to 5.3 MeV Alpha-Particles", Radiat. Prot. Dos., 65, 13-16 (1996).

[Ga 98] Gamboa-deBuen, I., Ruiz, C. G., Oliver, A., Lopez K. And Brandan, M. E., "Measurement of the thermoluminescent response (supralinearity and efficiency) of LiF : Mg,Ti exposed to 0.7 MeV protons", Nucl. Instrum. Meths., B134, 136-148 (1998).

[Ge 98] Geiss, O. B., Kramer, M., and Kraft, G., "Efficiency of thermoluminescent Detectors to heavy charged particles", Nucl. Instrum. Meths., B142, 592-598, (1998).

[Ho 84] Horowitz, Y. S., "Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry", Vol II, Boca Raton, CRC Press (1984).

[Ho 90] Horowitz, Y. S., "Mathematical modelling of TL supralinearity for heavy charged particles", Radiat. Prot. Dosim. 33:75, 1990.

[Ho 96] Horowitz, Y. S., Rosenkrantz M., Mahajna S., Yossien D. "The track interaction model for alpha particle induced thermoluminescence supralinearity: dependence of the supralinearity on the vector properties of the alpha particle radiation field". J. Phys., D 29:205, (1996).

[Ho 01] Horowitz, Y. S., Avila O., Rodriguez-Villafuerte M. "Theory of heavy charged particle response (efficiency and supralinearity) in TL Materials". Nuclear Instruments and Methods B 184, 85, (2001)

[Ka 80] Kalef-Ezra, J. "Study of the applicability of track structure theory to thermoluminescence". Tesis, Ben Gurion University of Negev, Israel (1980).

[Ka 82] Kalef-Ezra, J. and Horowitz, Y. S., "Heavy charged particle thermoluminescence dosimetry track structure theory and experiments", Int. J. Radiat. Isot., 33, 1085 (1982).

[Ma 85] Mahesh, K. Y D. R. Vij "Techniques of radiation dosimetry". Wiley Eastern Limited. India (1985).

[Mc 95] McKeever, W.S., Moscovitch, M., and Townsend P.D., 1995, Fluorides "Thermoluminescence dosimetry materials: Properties and uses", Nuclear Technology Publishing (1995).

[Mo 86] Moscovitch M., Horowitz Y.S. "Microdosimetric track interaction model applied to alpha particle induced supralinearity and linearity in LiF:Mg,Ti". Radiat. Prot. Dosim., 17:487 (1986).

[Mo 88] Moscovitch M., Horowitz Y.S. "A microdosimetric track interaction model applied to alpha particle induced supralinearity and linearity in thermoluminescent LiF:Mg,Ti". J. Phys. D: Appl. Phys. 21 804-814 (1988).

[Po 71] Podgorsak, E.B., P.R. Moran, J.R. Cameron., "Interpretation of resolved glow curve shapes in LiF:Mg,Ti (TLD-100) from 100 K to 500 K". Proc. 3rd Int. Conf. On Luminescence Dosimetry, Riso Report 249 (1971).

[Ra 45] Randall, E. F., and Wilkings, M. H. F., 1945, "The phosphorescence of various solids", Proc. R. Soc. London Ser. A. 1984, 347, 145 (1945).

[Ro 00] Rodríguez-Villafuerte, M., Buenfil, A. E., Gamboa-deBuen, E., Ruiz-Trejo, C., Brandan, M. E., Yossian, D., Satinger, D., Horowitz, Y. S., "Study of the TL response of LiF:Mg,Ti to 3 and 7.5 MeV helium ions: Measurements and interpretation in terms of the track interaction model", Nucl. Instrum. Meths., **B 160**, 377-386 (2000)

[Ro 02] Rodríguez Laguna Alejandro, "Estudio sobre la reproducibilidad de microcubos TLD-100 y parámetros que la afectan", Reporte de Servicio Social IFUNAM, (2002).

[Sc 90] Schmidt, P., Fellingner, J., and Hubner, K., "Experimental determination of the TL response for protons and deuterons in various detector materials", Radiat. Prot. Dosim., 33, 171-173 (1990).

Fe de erratas

Página 32

| VARIABLE | CORRIDA EN EL ACELERADOR | |
|------------------------|--|--|
| | PRIMERA | SEGUNDA |
| θ_{DBS} | $135^{\circ} \pm 1^{\circ}$ | $135^{\circ} \pm 1^{\circ}$ |
| θ_{TLD} | $36^{\circ} \pm 1^{\circ}$ | $36^{\circ} \pm 1^{\circ}$ |
| R_{DBS} | 11.2 ± 0.1 cm | 11.1 ± 0.1 cm |
| R_{TLD} | 10.3 ± 0.1 cm | 10.3 ± 0.1 cm |
| r_{DBS} | $9.9 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-4}$ cm | $9.9 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-4}$ cm |
| $N_b(\theta_{DBS})$ | 33025±268 | 33364±273 |
| $N_a(\theta_{DBS})$ | 3345403±61023 | 3337040±51193 |
| $\phi_b(\theta_{TLD})$ | $10.0 \times 10^7 \pm 1.1 \times 10^7$ p/cm ² | $10.1 \times 10^7 \pm 1.1 \times 10^7$ p/cm ² |
| $\phi_a(\theta_{TLD})$ | $1.0 \times 10^{10} \pm 1.2 \times 10^9$ p/cm ² | $1.0 \times 10^{10} \pm 1.1 \times 10^9$ p/cm ² |

Tabla 3.4

Página 76

$$u^2(R_{TLD}) = \frac{r_{BT}^2 u^2(r_T) + r_T u^2(r_{BT})}{r_{BT}^2 + r_T^2} \quad (A.6)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN