UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

DOSIMETRIA AMBIENTAL CON DETECTORES DE ESTADO SOLIDO TERMOLUMINISCENTES

T E S I S

QUE PARA OBTENER
EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA

LAURO JAVIER PEDRAZA CONTRERAS

- 1978 -

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

TESIS 1978
M.T. 329
ADQ
FECHA
PROC
$

JURADO ASIGNADO

Presidente	M. en C. MANUEL NAVARRETE TEJERO
Vocal	M. en C. JUAN LARTIGUE GORDILLO
Secretario	I. Q. ERNESTO PEREZ SANTANA
1er Suplente	Dr. ANIBAL BASCUÑAN BLASET
2o Suplente	Fis. RAFAEL TEROL TORRES

LABORATORIO DE CIENCIA BASICA, Facultad de Química, UNAM.

Sustentante	LAURO JAVIER PEDRAZA CONTRERAS
Asesor	I. Q. ERNESTO PEREZ SANTANA

A MIS PADRES Y
A MIS HERMANOS

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION.	1
CAPITULO I.	
Generalidades.	4
Modelo Teórico de la TL.	6
CAPITULO II.	
Instrumentación Asociada y Principales fuentes de Error.	24
1. Variaciones en el Ciclo de Calentamiento.	25
2. Variaciones en la Eficiencia de Colimación de la Luz Emitida por el Fósforo.	26
3. Variaciones en la Sensibilidad del Detector.	26
4. Variaciones en la Corriente Obscura.	27
PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACION	
I. Calibración de la Fuente Radiactiva.	28
II. Rango de Calibración.	29
III. Dosímetros Utilizados para la Calibración.	30
IV. Frecuencia de Calibración	30
CAPITULO III.	
Normas y Procedimientos Para Dosimetría Ambiental con un Sistema TL.	31
Criterios de Selección de un Sistema Termoluminiscente para Monitoreo Ambiental	31
1. Procedimientos Generales de Operación.	33

Pag.

1.1. Procedimientos Generales de las Pruebas que se Realicen. 33

1.2. Pruebas de Laboratorio de un Sistema TL. 34

2. Procedimientos de las Pruebas de Laboratorio. 35

2.1. Uniformidad. 35

2.2. Reproducibilidad. 35

2.3. Dependencia de la Energía. 36

2.4. Dependencia Direccional. 36

2.5. Dependencia de la Temperatura. 37

2.6. Autoirradiación. 38

2.7. Condiciones Ambientales. 39

3. Procedimientos de Campo. 39

3.1. Empaque de los Dosímetros. 39

3.2. Sitios de Monitoreo. 40

3.3. Instalación de los Dosímetros. 40

3.4. Aislamiento de la Exposición de Campo. 40

4. Procedimientos de Elaboración del Informe. 41

CONCLUSIONES. 43

APENDICE A. 44

BIBLIOGRAFIA. 45

BIBLIOGRAFIA ESPECIAL PARA LOS CAPITULOS II y III. 49

INTRODUCCION

La proliferación de fuentes de radiación hechas por el hombre, particularmente plantas nucleoeléctricas, ha creado la necesidad de medir los niveles de exposición a la radiación de orígen natural para obtener un nivel de referencia con el objeto de evitar que indevidamente se asocie a la industria atómica el incremento en los niveles de radiactividad natural. Los niveles de radiactividad ambiental son el resultado del continuo bombardeo a la tierra por los rayos cósmicos, por la constante desintegración de los elementos radiactivos contenidos en las capas superiores de la corteza terrestre (^{238}U y ^{232}Th principalmente, con pequeñas cantidades de ^{40}K y trazas de ^{87}Rb, ^{115}In y ^{50}V), además contribuye también el creciente aumento de las instalaciones nucleares, estos niveles no son constantes, sino que varian y dependen de un gran número de factores, entre los principales tenemos, la altura sobre el nivel del mar, epoca del año, altitud, latitud y material geológico constituyente de la corteza terrestre.

Para medir estos niveles de radiación, exis-

ten una gran variedad de instrumentos, por ejemplo, los instrumentos que se basan en detectores de centelleo o ionización de gas, representan un excelente método para medir fluctuaciones en periodos de tiempo pequeños; desafortunadamente, estos aparatos son grandes, costosos y requieren de un buén servicio de mantenimiento; las películas fotográficas, aunque todavía se utilizan en dosimetría ambiental, no son lo suficientemente estables bajo condiciones variables de temperatura y humedad; los vidrios radiofotoluminiscentes, debido a su buena estabilidad pero pobre sensibilidad, unicamente es recomendable utilizarlos por periodos de exposición grandes (del orden de años). Desde 1950 en que Daniels propuso que el fenómeno termoluminiscente podría ser utilizado como un dosímetro de radiación, rápidamente se ha convertido en uno de los métodos mas comunes, el uso de dosímetros termoluminiscentes en la dosimetría ambiental ofrece varias ventajas, baratos, reutilizables, tamaño pequeño, amplio rango de respuesta lineal, ofrecen la posibilidad de realizar medidas directas de dosis de exposición en condiciones en las cuales otras formas de dosimetría serian practicamente imposibles y por último, otra gran ventaja es su uso por períodos de exposición grandes para detectar dosis pequeñas en el rango de fondo natural de radiación.

El límite inferior de detección se determina por la cantidad de radiación de fondo, el período de exposición y la precisión del sistema dosimétrico. Entre las desventajas que este método presenta, están los errores que se asocian con las propiedades del material termoluminiscente y el sistema lector, por otro lado también limitan la precisión de las medidas los errores sistemáticos de la metodología utilizada.

En este trabajo, se presenta en el capítulo I, una explicación sencilla de lo que es el fenómeno termoluminiscente y su aplicación en la dosimetría ambiental, en el capítulo II se describe el principio básico que rige a los equipos lectores termoluminiscentes, las principales fuentes de error asociadas con este y los procedimientos de calibración. Por último, en el capítulo III se presenta un panorama general de las principales normas y procedimientos que se deben de seguir para poder con una mayor confiabilidad y precisión posibles, realizar una dosimetría ambiental con detectores de estado sólido termoluminiscentes.

CAPITULO I

GENERALIDADES

Cuando la materia absorbe radiación ionizante, mucha de esta energía se transforma en calor y una pequeña fracción se utiliza para romper enlaces físicos; en algunos materiales, parte de esta energía se almacena en estados metaestables, los cuales pueden reemitirla como fotones luminiscentes* por estimulación térmica a una temperatura significativamente superior a la temperatura a la que se llevó a cabo la irradiación [4,5,6]. Al fenómeno de la emisión de la energía como fotones luminiscentes por estimulación térmica se le denomina TERMOLUMINISCENCIA y al material que presenta este fenómeno FOSFORO

La termoluminiscencia, es un caso especial de la fosforescencia, un material fosforescente, emite luz después de haber sido expuesto a luz ultravioleta, radiación ionizante o algún otro agente excitante. En realidad, fosforescencia y termoluminiscencia son términos que se utilizan para describir dos formas dife-

* Radiación electromagnética, la cual generalmente es emitida en la región visible del espectro.

rentes de un mismo fenómeno, en el caso de la fosforescencia, la temperatura se mantiene constante durante la emisión luminiscente y el tiempo promedio de vida de emisión, que es el período de tiempo requerido para que la intensidad fosforescente decrezca a $(1/e)$ de su valor inicial, puede ser del orden de segundos en estado sólido[36]. En la termoluminiscencia, el fósforo es expuesto al agente excitante cuando este está frío (temperatura ambiente), ocurriendo la emisión luminiscente cuando la temperatura del fósforo se eleva por la adición de energía calorífica hasta un valor determinado, el cual es característico para cada material termoluminiscente y está en función principalmente, de la competencia que existe a altas temperaturas entre la emisión luminiscente y la emisión de radiación infrarroja.

La base de un fósforo, es un cristal aislante puro, el cual se ha hecho termoluminiscente por la adición de una pequeña proporción de átomos, a los que se les denomina activadores, estos activadores pueden ser átomos como impurezas, que están presentes en el material en concentraciones relativamente pequeñas, también, pueden ser un pequeño exceso estequiométrico de alguno de los elementos constituyentes del fósforo, en este caso, se habla de autoactivación. La concentración óptima del activador para un material termolumi-

niscente, únicamente se pueden determinar experimentalmente [11, 27, 35]. Los átomos del activador, se supone ocupan posiciones intersticiales o substitucionales en la red cristalina (defectos Frenkel y Schottky) [11, 23, 35]. Fig.1.

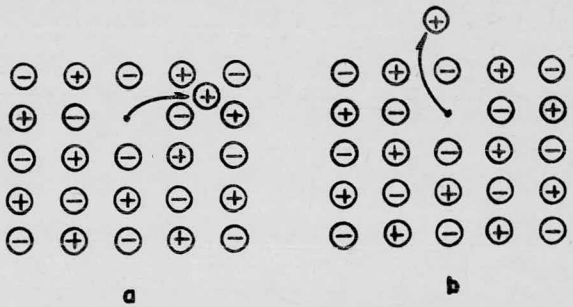

Fig.1. Cristal que presenta defectos, a) Frenkel b) Schottky.

Modelo Teórico de la Termoluminiscencia.

Para estudiar el fenómeno básico de la termoluminiscencia, se han desarrollado modelos que explican al fenómeno únicamente desde el punto de vista cualitativo. Los primeros en postular un modelo para este fenómeno, fueron Randall y Wilkins en 1945 [27]; posteriormente Klanses y Wise en 1946 [19], Lushchik en 1955 [22] y Hill también en 1955 [17], extendieron la teoría desarrollada por Randall y Wilkins para tratar pro

cesos bimoleculares y reatrapamiento de electrones liberados. Halperin y Braner en 1960[16], hacen uso ya de las propiedades de las curvas termoluminiscentes desarrolladas por sus antecesores y a partir de estas, evaluan energias térmicas de activación.

Aquí se desarrolla el modelo de Randall y Wilkins, por ser uno de los menos sofisticados y además de ser la base de los modelos posteriores, es el que describe al fenómeno termoluminiscente de una forma mas general.

El modelo se basa, en que los electrones que se encuentran en estados metaestables, son llevados térmicamente a un estado excitado, del cuál ellos regresan al estado base con emisión de termoluminiscencia[6]. Este modelo, basado en esquemas cualitativos de niveles de energía y que muestra los posibles estados energéticos de los electrones del cristal, tiene un alcance de aplicabilidad limitado por su caracter aproximado. Algunos de los parámetros del modelo, se tienen que obtener experimentalmente para compararlos con la teoría[1].

La fig. 2, muestra un diagrama hipotético de los niveles de energía de un cristal aislante, que presenta termoluminiscencia, debida a radiación ionizante.

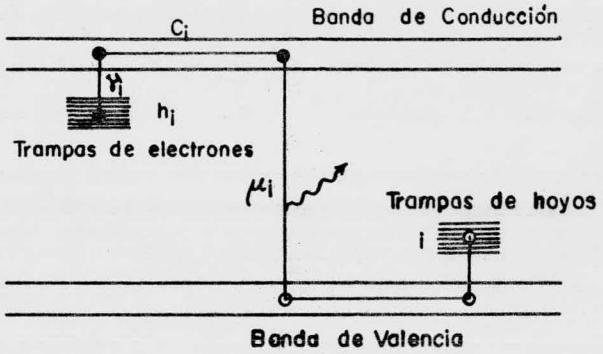

Fig. 2.- Esquema de niveles de energía.

Cuando la radiación ionizante se hace incidir sobre el cristal, ésta libera un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción, dejando un hoyo en la banda de valencia, el electrón y el hoyo se mueven a través del cristal, hasta que se recombinan o son atrapados en estados metaestables (trampas de electrones y trampas de hoyos), fig. 3. Estos estados metaestables, se asocian con los defectos en el cristal como sitios impuros.

Según este modelo existen dos posibles caminos por los cuales pueden ser emitidos fotones termoluminiscentes, después de haber dado al cristal una energia E suficiente en forma de calor [1,6],

Fig. 3. Al hacer incidir la radiación ionizante sobre el cristal, el electrón que ésta libera, y el hoyo que forma, se mueven en el cristal hasta que son atrapados en estados metaestables.

a) el electrón puede recibir la energía suficiente para ser llevado a la banda de conducción, el cual podrá moverse libremente hasta recombinarse con una trampa hoyo y emitir por este proceso un fotón termoluminiscente, fig. 4. y

b) para que ocurra el otro posible camino, es necesario que la trampa hoyo sea menos estable que la trampa electrón, así, al suministrarle energía al cristal, el hoyo

recibiría la energía suficiente para moverse, hasta recombinarse con un electrón atrapado y emitir un fotón termoluminiscente, fig. 5.

CAMINOS POSIBLES POR LOS CUALES PUEDEN SER EMITIDOS FOTONES TL.

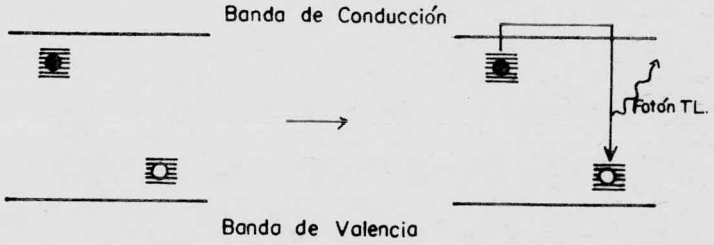

Fig. 4.- La trampa electrón es menos estable, la trampa agujero es el centro emisor.

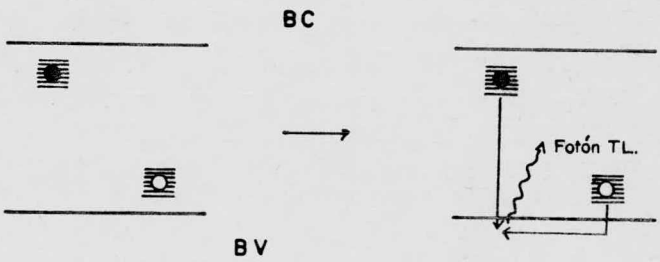

Fig. 5.- La trampa agujero es menos estable, la trampa electrón es el centro emisor.

La energía E (profundidad de la trampa), es la energía asociada con la temperatura que se necesita para que exista la emisión de fotones termoluminiscentes, la probabilidad de emisión de los fotones aumenta al aumentar la temperatura, hasta llegar a un máximo a una temperatura la cual es característica para cada fósforo.

Si en el cristal existen estados metaestables de diferente energía E_i, entonces aparecerán tantos máximos locales de probabilidad como estados metaestables de energía existan en el cristal; a estas curvas, se les llama curvas termoluminiscentes, fig. 6.

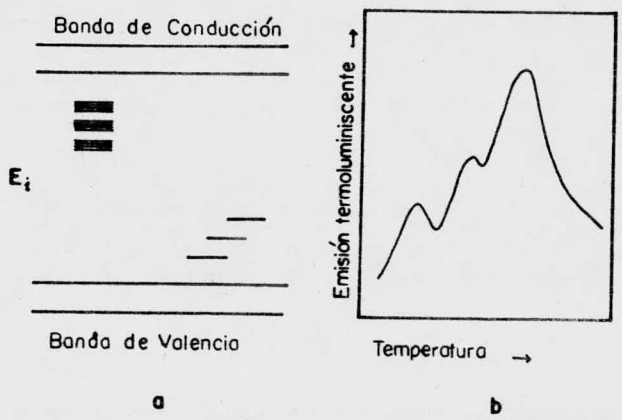

Fig. 6.- a) Diagrama hipotético de un cristal con diferentes estados metaestables de energía E_i
b) curva termoluminiscente típico, del mismo cristal.

Con las consideraciones anteriores, se puede escribir el sistema simplificado de ecuaciones diferenciales de Schön, para la densidad de electrones en la trampa i ,

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = -\gamma_i(t)\, h_i(t) \qquad (1)$$

y la densidad en la banda de conducción,

$$\frac{dc_i}{dt} = \gamma_i(t)\, h_i(t) - \mu_i c_i \qquad (2)$$

donde:

$\gamma_i(t)$= Probabilidad por unidad de tiempo para que se libere un electrón de la trampa i , hacia la banda de conducción.

$h_i(t)$= Concentración de electrones en la trampa i .

c_i = Concentración de electrones en la banda de conducción que vienen de la trampa i .

μ_i = Probabilidad de transición por unidad de tiempo de los electrones hacia la banda de valencia.

Como la intensidad $I(t)$ de termoluminiscencia, es proporcional al número de transiciones radiativas por unidad de tiempo y volumen durante el ciclo de calentamiento, se puede escribir:

$$I(t) = \sum I_i(t) \approx \sum \mu_i c_i \qquad (3)$$

Si se considera que c_i , concentración de electrones en la banda de conducción, es constante, la solución de las ecuaciones (1) y (2) es la siguiente:

De la ecuación (1) , se tiene,

$$\frac{dh_i(t)}{h_i(t)} = -\gamma_i(t)\, dt \qquad (4)$$

haciendo la integración en ambos lados,

$$\int_{h_i(o)}^{h_i(t)} \frac{dh_i(t)}{h_i(t)} = \int_0^t -\gamma_i(t)\, dt \qquad (5)$$

$$\ln \frac{h_i(t)}{h_i(0)} = -\int_0^t \gamma_i(t)\, dt \qquad (6)$$

despejando $h_i(t)$,

$$h_i(t) = h_i(0)\, e^{-\int_0^t \gamma_i(t)\, dt} \qquad (7)$$

como ℓ_i es constante, de la ecuación (2) se tiene,

$$\frac{d\ell_i}{dt} = \gamma_i(t)\, h_i(t) - \mu_i \ell_i = 0 \qquad (8)$$

de donde

$$\mu_i \ell_i = \gamma_i(t)\, h_i(t) \qquad (9)$$

substituyendo (7) en (9) e igualando con (3) se tiene:

$$I_i(t) = \gamma_i(t)\, h_i(0)\, e^{-\int_0^t \gamma_i(t)\, dt} \qquad (10)$$

Por otro lado, la probabilidad por unidad de tiempo para que se libere un electrón de la trampa i, hacia la banda de conducción, con una profundidad de trampa de E, a una temperatura T, es de la forma,

$$\gamma_i(t) = s e^{-E/kT} \qquad (11)$$

donde k es la constante de Boltzman y s es una constante, la cual puede variar con la temperatura. Si a la trampa se le considera como a una caja de potencial, s será del orden de la frecuencia vibracional del cristal ($2000\ cm^{-1}$ [18]). Substituyendo (11) en (10),

$$I_i(t) = s e^{-E/kT} n_i(0)\, e^{-\int_0^t s e^{-E/kT}\, dt} \qquad (12)$$

si se denomina β a la velocidad de calentamiento y se considera constante, se tiene,

$$\beta = \frac{dT}{dt} \qquad (13)$$

$$dt = \frac{dT}{\beta} \qquad (14)$$

substituyendo (14) en (12),

$$I_i(t) = n_i(0)\, s\, e^{-E/kT}\, e^{-\frac{s}{\beta}\int_0^T e^{-E/kT}\, dT} \qquad (15)$$

Esta expresión, representa la curva termoluminiscente, para un fósforo que contiene trampas de una profundidad E, factor de frecuencia s y una velocidad de calentamiento β.

La función $I(t)$ es una de las funciones que mejor caracterizan a un fósforo, por ejemplo, la aparición de picos termoluminiscentes a bajas temperaturas (profundidad de trampas de $E<0.8$ eV.[6]), implica que el fósforo pierde la energía almacenada desde el momento en que éste está siendo expuesto al agente excitante (a temperatura ambiente); en el caso contrario, si los picos aparecen a muy altas temperaturas, predominará la radiación infrarroja debida a la incandescencia del fósforo sobre la emisión termoluminiscente, fig. 7.

Los principales factores que afectan la forma de la curva termoluminiscente y la temperatura a la cual aparecen los picos, son entre otros, la velocidad de calentamiento, el tipo de radiación que se utilice para su excitación y los niveles de exposición, la for

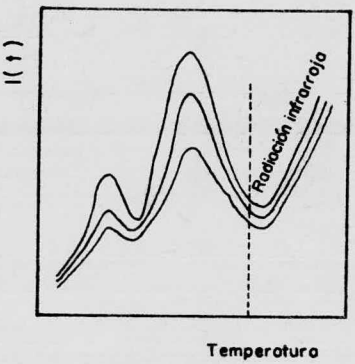

Fig. 7.- Competencia de la radiación infrarroja contra termoluminiscencia.

ma y la conductividad térmica, así como también su masa y capacidad calorífica.

La velocidad de calentamiento, afecta la altura y la amplitud del pico, fig. 8. Esta variable es de particular interés, principalmente cuando se relaciona la dosis de exposición con la altura del pico o con el area bajo la curva[6].

El que algunos materiales, cambien la forma de la curva al ser expuestos a diferentes niveles de exposición, se debe a que no todas las trampas se saturan a la misma exposición[24], fig. 9.

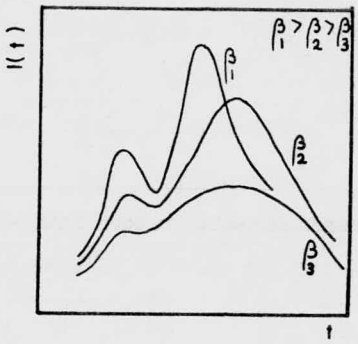

Fig. 8.- Influencia de la velocidad de calentamiento β, sobre la curva termoluminiscente.

El tamaño, la forma, la conductividad térmica, la masa y la capacidad calorífica del fósforo, son factores que influyen principalmente sobre la temperatura existente en el centro del fósforo durante la emisión termoluminiscente.

Este fenómeno, desde 1950 en que Daniels[12] propuso que podría ser utilizado como un dosímetro de radiación, rápidamente se ha convertido en uno de los métodos mas comunes y utiles para medir radiación. Aún cuando ésta técnica es relativamente joven, los campos en los que puede ser aplicada son variados y se pueden mencionar como los mas importantes, la Radioprotección y la Dosimetría Clínica, en radioprotección se utiliza en Dosimetría Personal, Dosimetría Ambiental y Radio-

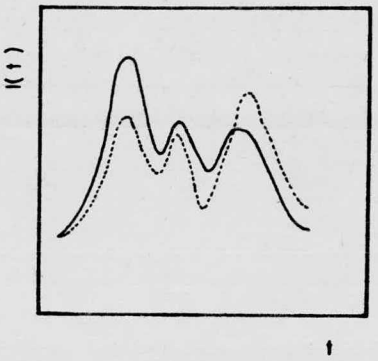

Fig. 9.- Curvas termoluminiscentes de un mismo cristal, irradiado a diferentes niveles de exposición.

protección de Población Civil; dentro de la dosimetría clínica se utiliza en Radioterápia y Diagnóstico de Rayos-X; otros campos en los que se ha aplicado mas recientemente son la Radiobiología, Geología y Arqueología[33] (Tabla I).

Las propiedades generales que hacen que los detectores termoluminiscentes sean utilizados en los campos mencionados en el párrafo anterior, son[2,31,34]:

i) Tamaño Pequeño.- Pueden llegar a ser del orden de 1 mm^3, aunque al disminuir su tamaño, aumentan las dificulta

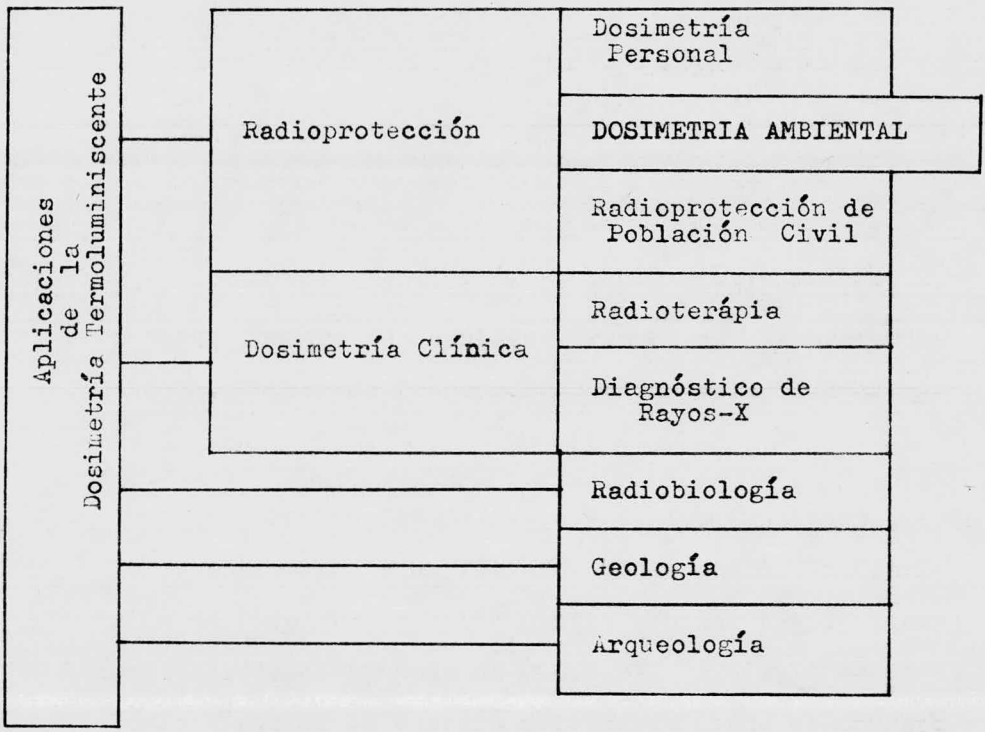

TABLA I.- Principales campos de aplicación de la dosimetría termoluminiscente (TLD).

des técnicas de manejo.

ii) Amplio Rango de Respuesta Lineal.-

$\sim$ (1mR a 10 R)

iii) Los dosímetros no alteran el campo de radiación.

iv) Medida directa de dosis.- Se pueden realizar medidas directas de dosis bajo condiciones en las cuales otras formas de dosimetría serían practicamente imposibles.

De esta gama de aplicaciones, la cual se resume en la Tabla I, es de particular interés la Dosimetría Ambiental, quien tiene como objetivos principales:

i) La estimación de la exposición de la población en areas con niveles anormales de radiación (grandes núcleos de población, hospitales, etc.).

ii) La estimación de la exposición de la población en la vecinidad de instalaciones nucleares (en las etapas pre y operacionales de la planta).

En realidad, para medir radiación ambiental existen una gran variedad de equipos, por ejemplo: los equipos que se basan en detectores de centelleo o ionización de gas[21], representan un excelente método no unicamente para realizar medidas integrales de dosis

sino que también son muy adecuados para hacer medidas de exposición en períodos de tiempo cortos y posibles fluctuaciones. Desafortunadamente estos aparatos son grandes, caros y requieren de un buén servicio de mantenimiento, lo que los hace poco atractivos para la Dosimetría Ambiental ya que esta se realiza a campo abierto.

Otro tipo de dosímetros son las películas fotográficas, que aunque todavía se usan, éstas no son lo suficientemente estables bajo condiciones extremas de temperatura y humedad lo que hace que disminuya su precisión y confiabilidad.

Los vidrios radiofotoluminiscentes, los cuales unicamente se pueden utilizar con una gran confiabilidad por períodos de exposición grandes (del orden de años), debido a que tiene una excelente estabilidad pero pobre sensibilidad[15].

Por último, los detectores termoluminiscentes representan un buén método para medir radiación ambiental, de los cuales existe una gran variedad de materiales que pueden utilizarse para este propósito, los mas utilizados en el monitoreo ambiental son: LiF:Mg,Ti (Harshaw TLD-100 y TLD-700, designados así por el fa-

bricante y su nombre se deriba del contenido de ^{7}Li). Aquí en México, además de los anteriores, frecuentemente se utiliza CaF_2:Dy (TLD-200). Otros detectores ampliamente utilizados en varios paises del mundo son: CaF_2:Mn; BeO; $CaSO_4$:Dy; $CaSO_4$:Tm; $Li_2B_4O_7$:Mn,Si y CaF_2:natural. (Tabla II). Estos datos fueron tomados de intercomparaciones internacionales de dosimetría ambiental que se han realizado en los Estados Unidos de Norteamérica[3,14,25].

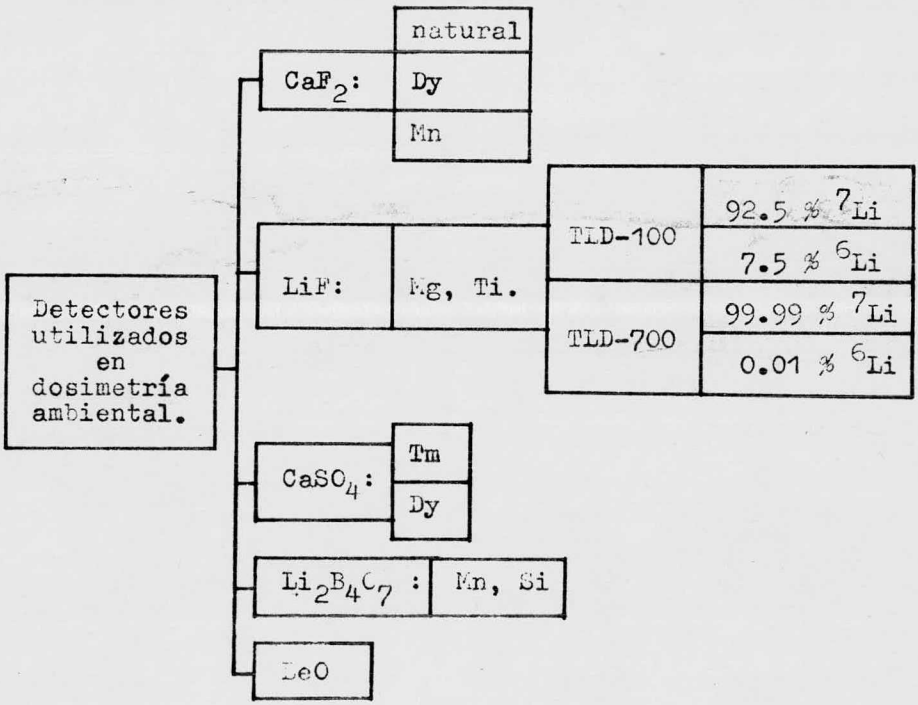

TABLA II.- Principales detectores utilizados en dosimetría Ambiental

CAPITULO II

INSTRUMENTACION ASOCIADA Y PRINCIPALES FUENTES DE ERROR

La instrumentación necesaria para observar la termoluminiscencia, es básicamente muy simple y consiste de un método para calentar el fósforo irradiado y un instrumento para detectar la termoluminiscencia emitida, todo esto dentro de una caja obscura[28,29]. Fig. 10.

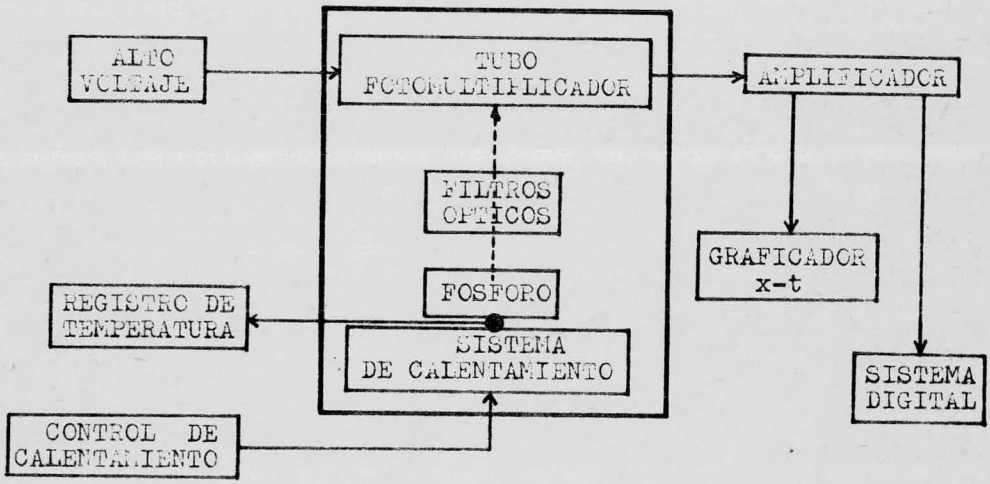

Fig. 10.- Diagrama Básico de un Equipo para Detectar Termoluminiscencia (TL)

Las principales fuentes de error en un equipo termoluminiscente, se pueden clasificar en cuatro grupos[29]:

1.- VARIACIONES EN EL CICLO DE CALENTAMIENTO

Al fósforo se le debe de aplicar un calentamiento perfectamente controlado, esto se debe a que en la mayoría de los casos la emisión termoluminiscente es sumamente dependiente del tratamiento térmico que se le dé al fósforo. De la grán variedad de métodos por los cuales puede llevarse a cabo el calentamiento, existen dos grupos principales[9,38],

a) Método Directo, el que puede ser por calentamiento ultrasónico, dieléctrico o infrarrojo.

b) Método Indirecto, el que puede ser uniendo al fósforo con un elemento de calentamiento, poniendolosobre una plancheta la cual se calienta eléctricamente o haciendo pasar gas caliente sobre él.

Comercialmente, el método indirecto es el mas común, en este tipo de calentamiento existen dos posibles causas de variación que pueden considerarse como

fuentes potenciales de error, que son variaciones en:

i) El ciclo de temperatura, y
ii) La transferencia de calor del medio de calentamiento al fósforo.

2.- VARIACIONES EN LA EFICIENCIA DE COLIMACION DE LA LUZ EMITIDA POR EL FOSFORO.

Los detectores se diseñan de tal forma que una fracción constante de la luz emitida por un cierto tipo de fósforo llegue al detector, por lo tanto, posibles causas de error son:

i) Variaciones en la posición del fósforo con respecto al detector y
ii) Variaciones en las propiedades ópticas del fósforo y en el camino que tiene que viajar la luz para llegar al detector.

3.- VARIACIONES EN LA SENSIBILIDAD DEL DETECTOR

Generalmente se le llama sensibilidad a la señal de salida por unidad de luz que entra al detector. Los errores mas comunes asociados con la sensibilidad son:

i) Agotamiento del detector

ii) La señal de salida no es linealmente proporcional a la luz que entra al detector.

4.- VARIACIONES EN LA CORRIENTE OBSCURA.

La corriente obscura se define como la lectura obtenida cuando un fósforo no irradiado es leído. Aún cuando una grán parte de esta lectura está asociada con el fósforo, existe una contribución de el instrumento de lectura en sí; la cual proviene de:

i) Ruido en el detector (emisión termoiónica a temperatura ambiente).
ii) Radiación infrarroja de áreas que están sujetas a calentamiento.
iii) Quimiluminiscencia (ej. luz emitida durante la oxidación de impurezas orgánicas).

Otro típo de errores que no están directamente implicados en el equipo pero que indirectamente afectan sobre la confiabilidad en la interpretación de los resultados, son los errores en la calibración. La calibración de un equipo termoluminiscente, consiste en la interpretación de larespuesta termoluminiscente (unidades arbitrarias) en términos de unidades de exposición, la cual idealmente deberá ser lineal. (Una respuesta no-lineal,

complica los procedimientos de calibración y require de un tratamiento mucho mas detallado para obtener una conversión correcta).

PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACION.

Antecedentes.- Como se mencionó anteriormente, la calibración consiste en la interpretación de una respuesta en unidades arbitrarias en términos de unidades de dosis de exposición, por lo tanto, es necesario contar con una fuente radiactiva con un campo de exposición calibrado y uno o un grupo de dosímetros (fósforos).

I) CALIBRACION DE LA FUENTE RADIACTIVA.

Los métodos empleados para determinar la calibración del campo de exposición de una fuente radiactiva, deben ser métodos perfectamente documentados. Algunos métodos aceptables para la calibración de una fuenteincluyen, comparaciones con equipo calibrado o fuentes radiactivas cuya calibración se haya hecho en instituciones como, National Bureau of Standards (EUA), The National Physical Laboratory (Inglaterra) o alguna otra institución similar.

Para dosimetría ambiental, la calibración de la exposición de la fuente, se recomienda que esté dentro de un 5 % de error.

Las fuentes generalmente utilizadas para calibración de este tipo de equipos, son entre otras: ^{137}Cs, ^{60}Co y ^{226}Ra.

II) RANGO DE CALIBRACION.

La calibración debe estar dentro de la región de respuesta lineal del equipo lector, donde la dosis mínima de exposición debe ser igual a la que resulte de una razón de exposición de 4.0 μR/hr durante una exposición igual al período de exposición del ciclo de campo. La calibración, siempre debe de hacerse partiendo de este valor mínimo e ir haciendo las irradiaciones correspondientes para dosis de exposición cada vez mayor, el objeto de partir de la dosis mínima, es con el fín de disminuir la influencia que causa la dosis residual que queda a los dosímetros, la cual es proporcional a la dosis recibida.

III) DOSIMETROS UTILIZADOS PARA LA CALIBRACION.

Como se verá en el capítulo siguiente, todos los dosímetros que se utilizan en un programa de dosimetría ambiental, tanto los dosímetros de campo como los de control y calibración, deben de ser de un mismo lote y mantenerse como tal durante el tiempo que dure el programa. El número de dosímetros debe de ser el suficiente para cumplir con los procedimientos generales (Capítulo III sección 1), estos dosímetros nunca deben de usarse para ningún otro propósito.

IV) FRECUENCIA DE CALIBRACION.

Una vez hecha la calibración general del equipo que incluye la calibración en un rango determinado, debe hacerse una lectura de referencia a una dosis cualquiera (siempre y cuando esté dentro del rango de calibración), cuando menos cada vez que se hagan lecturas de los dosímetros de campo (ésta lectura puede ser antes de, después de o con la lectura de los dosímetros de campo.).

CAPITULO III

NORMAS Y PROCEDIMIENTOS PARA DOSIMETRIA AMBIENTAL CON UN SISTEMA TERMOLUMINISCENTE

Objetivo.- Desarrollar una guía para la selección, evaluación en el laboratorio y aplicación de un sistema termoluminiscente en dosimetría ambiental rutinaria.

Alcance.- El alcance de este trabajo, es la medida de los niveles de exposición a radiaciones X y gama ambientales; por lo tanto medidas directas de dosis absorbidas por el hombre o por sus organos críticos, no están incluidas.

CRITERIOS DE SELECCION DE UN SISTEMA TERMOLUMINISCENTE (TL) PARA MONITOREO AMBIENTAL.

Aparte de las razones prácticas para seleccionar un sistema TL, tales como costo, versatilidad y eficiencia en el manejo de datos, se deben considerar otros requerimientos técnicos particulares que se necesitan para realizar estudios ambientales con este tipo de sistemas. Los parámetros esenciales que requieren de una investigación inicial incluyen, la dependencia energéti

ca, direccional y de temperatura, sensibilidad del sistema sobre el rango de exposición de interés y estabilidad en las condiciones ambientales bajo las cuales éste va a ser usado.

La dependencia energética de los dosímetros, debe ser tan uniforme como sea posible. Esto generalmente se logra empacando los dosímetros para disminuir la supralinealidad de la respuesta que algunos materiales termoluminiscentes presentan[10]. Al empacar los dosímetros, también se protegen contra luz ultravioleta, humedad y polvo. El empaque generalmente introduce una dependencia direccional, por lo que se requiere hacer las pruebas correspondientes (Sección 2.4, de este capítulo).

La sensibilidad del sistema TL sobre el rango de exposición en el cual se desean hacer la mediciones, es de particular interés y deben de hacerse exposiciones desde unos cuantos días hasta un año, para determinar el período que se utilizará según la precisión que se desee.

Las variaciones en la respuesta TL como una función de los cambios de temperatura con el tiempo, es un problema que está asociado con el desvanecimiento de

la señal TL almacenada.

1.- PROCEDIMIENTOS GENERALES DE OPERACION.

La operación y calibración del sistema TL se debe determinar bajo condiciones de laboratorio en un campo de radiación conocido.

1.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES DE LAS PRUEBAS QUE SE REALICEN.

1.1.1. Todas las pruebas deben de realizarse bajo condiciones de calibración.

1.1.2. Todas las pruebas deben de realizarse con las mismas condiciones del sistema TL como si éste fuera a usarse para mediciones de campo.

1.1.3. Las exposiciones que se utilicen para cada prueba que se realice, siempre deben de estar dentro de la región de respuesta lineal del sistema (si se prefiere dentro del rango de calibración).

1.1.4. El número de dosímetros que se utilice para cada prueba, debe ser el suficiente para asegurar que los resultados estarán dentro de un 10 % con un nivel de confianza del 95 % (Apéndice A), este criterio también aplica para los dosímetros de campo.

1.2. PRUEBAS DE LABORATORIO DE UN SISTEMA TL.

Este tipo de pruebas son esenciales para determinar la precisión y exactitud de los resultados del monitoreo ambiental. La clave de estas pruebas es la efectividad en la simulación de las condiciones bajo las cuales el sistema vá a ser usado. Los dosímetros que se utilicen en estas pruebas, deben ser empacados como si fueran a ser expuestos en el campo.

Los parámetros que se van a examinar, los podemos dividir en dos grupos.

a) Parámetros que dependen del sistema, que incluyen la uniformidad de la respuesta entre todos los dosímetros (UNIFORMIDAD), la reproducibilidad de un solo dosímetro (REPRODUCIBILIDAD) y la respuesta como una función del nivel de exposición (Calibración, capítulo II).

b) Parámetros que dependen de los dosímetros, estos incluyen, la dependencia de la energía, dependencia direccional, dependencia de temperatura, autoirradiación y dependencia de luz y humedad (condiciones ambientales).

2. PROCEDIMIENTOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

2.1. UNIFORMIDAD.

Las pruebas para la uniformidad de respuesta de un grupo de dosímetros, deberá de incluir a todos los dosímetros que se van a usar y mantenerlos como un lote (este lote debe de incluir a los dosímetros de campo, de calibración, de control y cualquier otro u otros dosímetros que se necesiten para llevar a cabo el programa de dosimetría ambiental).

La uniformidad se determina exponiendo al lote de dosímetros varias veces a una misma dosis de exposición (esta dosis de exposición debe estar dentro de la región de respuesta lineal del sistema TL). Este procedimiento nos permite obtener la sensibilidad relativa de cada dosímetro y con el objeto de disminuir la desviación estandar del lote, se normaliza la respuesta de cada dosímetro con respecto al valor promedio obtenido durante todas las exposiciones recibidas durante la realización de esta prueba.

2.2. REPRODUCIBILIDAD.

La reproducibilidad de la respuesta de un solo

dosímetro, es necesaria si se esperan realizar pruebas periódicas de la estabilidad del sistema TL con el tiempo.

La reproducibilidad se determina exponiendo al dosímetro que se está estudiando varias veces a una misma dosis de exposición y comparando la respuesta obtenida cada vez (la dosis de exposición debe estar dentro de la región de respuesta lineal del sistema TL).

2.3. DEPENDENCIA DE LA ENERGIA.

Generalmente existe información acerca de este parámetro, ya sea en literatura técnica o información que proporcionan los fabricantes de los dosímetros, si no se cuenta con ninguno de estos tipos de información, entonces se debe de estudiar la respuesta de los dosímetros a una misma dosis de exposición proveniente de diferentes fuentes radiactivas calibradas y de diferentes energias (entre 30 keV y 3 MeV). Si la dependencia de energía es no uniforme, con estas mismas fuentes se deberá estudiar el blindaje que se utilizará en el empaque de los dosímetros para su exposición en el campo.

2.4. DEPENDENCIA DIRECCIONAL.

Aunque esta es una información que también

generalmente se encuentra en la literatura o la proporciona el fabricante, deberá determinarse comparando la respuesta de un grupo de dosímetros expuestos en la orientación rutinaria con respecto a la fuente de calibración con las respuestas obtenidas con estos mismos dosímetros expuestos en diferentes orientaciones. Si en esta prueba no se cumple con 1.1.4, se debe de probar otro tipo de blindaje.

2.5. DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA.

La dependencia de la temperatura se manifiesta en la forma de desvanecimiento, que es la pérdida de la señal como una función del tiempo que dure la exposición y/o almacenamiento de los dosímetros. Este parámetro también frecuentemente se encuentra en la literatura. Si el desvanecimiento es considerable para un cierto tipo de dosímetros, se deben de hacer investigaciones de laboratorio exponiendo a un grupo de dosímetros a una dosis determinada dentro de la región de respuesta lineal del sistema, estos dosímetros se almacenan junto con otro grupo de dosímetros no irradiados durante un período igual a la duración del ciclo de campo a una temperatura constante, al término del ciclo, los dosímetros no irradiados se irradian a una dosis de exposición igual a la que recibieron los que fueron irradiados al

principio del ciclo, procediendose después a la lectura de los dos grupos de dosímetros bajo las mismas condiciones de operación del sistema. Esta prueba debe de hacerse cambiando la temperatura de almacenamiento hasta que se cubra todo el rango de temperaturas esperadas en el sitio donde se vaya a llevar a cabo la dosimetría ambiental. Los cálculos para la corrección por desvanecimiento se hacen comparando la respuesta de los dos grupos de dosímetros (irradiados al principio del ciclo e irradiados al final del ciclo), tomando como lectura sin desvanecimiento los resultados obtenidos por el grupo de dosímetros que se irradian al final del ciclo, este resultado se reporta en porcentaje de desvanecimiento. Cuando la dependencia de temperatura es muy pequeña, este parámetro puede eliminarse ya sea dando un tratamiento térmico a los dosímetros antes de su lectura o al momento de ser leídos se les aplica un calentamiento inicial con una velocidad de calentamiento muy grande (de 80 a 120 C/segundo).

2.6. AUTOIRRADIACION.

La autoirradiación se debe principalmente a trazas de material radiactivo contenido en los materiales que se utilizan para el empaque. La cantidad de autoirradiación se puede determinar leyendo a los dosímetros después de un período grande de almacenamiento en

un lugar donde la razón de exposición es constante y bién conocida. A la lectura obtenida por estos dosímetros se les resta la exposición ambiental y el resultado es la autoirradiación.

2.7. CONDICIONES AMBIENTALES.

Las pruebas de las condiciones ambientales incluyen la dependencia de la luz y humedad las cuales son de menor interés debido a que los dosímetros siempre se exponen en el campo, protegidos con el empaque.

Si se quiere simular un problema específico, entonces se compara la respuesta de un grupo de dosímetros expuestos en las condiciones de campo con otros dos grupos los cuales estarán expuestos en las siguientes condiciones: El primero se expondrá de tal manera que la luz incida directamente sobre los dosímetros y el segundo se expondrá con el empaque normal como si fura para exposición en el campo pero con éste lleno de agua. Los tres grupos de dosímetros se deben de exponer en el campo por un período igual a la duración del ciclo de campo. Al comparar las tres respuestas obtenidas se puede determinar la influencia de la luz y humedad.

3. PROCEDIMIENTOS DE CAMPO.

3.1. EMPAQUE DE LOS DOSIMETROS.

En realidad, el empaque de los dosímetros es una consecuencia de aplicar las pruebas de la sección 2, por lo tanto el empaque debe ser aquel que minimice los errores introducidos por los parámetros 2.3, 2.4 y 2.7 principalmente.

3.2. SITIOS DE MONITOREO.

Los sitios para instalar los dosímetros deben de escogerse de tal manera que sean lo mas representativos posible de los alrededores. En general, sitios aceptables incluyen areas abiertas que no estén blindadas por grandes masas adyacentes.

El número de dosímetros que se instalen en el campo, debe ser el suficiente para cumplir con las especificaciones de 1.1.4 de este capítulo.

3.3. INSTALACION DE LOS DOSIMETROS.

En el campo, los dosímetros se deben suspender a una altura de 1 0.3 metros sobre el nivel del suelo. Los dosímetros deben de colocarse tan lejos como sea posible de objetos o materiales que puedan causar perturbaciones al campo de radiación.

3.4. AISLAMIENTO DE LA EXPOSICION DE CAMPO.

Todas las exposiciones recibidas por los dosímetros como resultado del almacenamiento y/o transito durante el ciclo de exposición, se deben de restar a la exposición total para aislar la exposición de campo. Para este propósito es que se utilizan los dosímetros de control.

Una vez aislada la exposición de campo, se le deberán de hacer las correcciones necesarias por el desvanecimiento y el resultado será la exposición recibida por los dosímetros durante el ciclo de campo, la cual puede transformarse para su informe como razón de exposición por hora o por año.

4. PROCEDIMIENTOS DE ELABORACION DEL INFORME.

Los informes de dosimetría ambiental realizada con un sistema termoluminiscente, deben ir acompañados de la siguiente información.

(1) Descripción del sistema termoluminiscente utilizado.

(2) Informe de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas.

(3) Duración del ciclo de campo y criterio de selección.

(4) Identificación de los sitios de exposición

(5) Explicación del método utilizado para el aislamiento de la exposición de campo.

(6) Explicación de cualquier corrección hecha de acuerdo con 3.4.

(7) Informe de los resultados del monitoreo ambiental como razón de exposición por hora o por año. Aquí también debe de mencionarse el cálculo del error en cada medida y su propagación en el resultado final.

Algunos de estos puntos pueden satisfacerse haciendo referencia a documentos anteriores.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha sido enfocado para dar un panorama general de lo que es el fenómeno termoluminiscente y los problemas que surgen al utilizar un sistema de éste tipo para realizar medidas de dosis de radiación ambiental.

Los problemas encontrados generalmente se agudízan con la tarea de medir exposiciones muy bajas bajo condiciones ambientales dificiles, la realización de esta tarea, no es del todo facil y como los dosímetros termoluminiscentes tienen una grán ventaja sobre otros detectores desde el punto de vista práctico y operacional, es importante que los usuarios potenciales estén enterados de los problemas y dificultades ya que con cuidado y uso apropiado éstos se pueden sobreponer.

La guía que en este trabajo se presenta, podrá ser de grán utilidad para obtener medidas adecuadas y correcta interpretación de los datos.

APENDICE A*

DETERMINACION DE UN INTERVALO DE CONFIANZA PARA EL VALOR MEDIO μ DE UNA DISTRIBUCION NORMAL CON VARIANZA CONOCIDA σ^2.

I. Se selecciona un nivel de confianza γ' (95 %, 99 % o el que se desee)

II. Se determina el valor correspondiente de c,

γ'	0.90	0.95	0.99	0.999
c	1.645	1.960	2.576	3.291

III. Se calcula el valor medio de la muestra

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

IV. Se calcula,

i) $k = \dfrac{c\sigma}{\sqrt{n}}$

ii) El intervalo de confianza para el valor medio μ de la población es:

$$\text{CONF}\left\{\mu - k \leq \mu \leq \mu + k\right\}$$

* Tomado de referencia (20) Capítulo 12, pp. 168.

BIBLIOGRAFIA

(1) Abedin-Zadeh, R., Proc. of 3rd Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry, Risø, 1971. pp. 41.

(2) Attix, F.H., Present Status of Dosimetry by Radio photoluminescence and Thermoluminescence Methods. AD 607357 (1964).

(3) Beck, H.L., 2nd Internat. Symposium on the Natural Radiation Environment. Houston (1972) Citado en Report ORNL-TM-4887.

(4) Becker, K., Health Phys., 27, 321 (1974).

(5) Becker, K., Nuclear Inst. Meth., 104, 405 (1972)

(6) Bjärngard, B., Rept. AE-109, Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm (1963 a)

(7) Burke, G. de P., et al, Paper presented at the Health Physics Society Tenth Midyear Tropical Symposium on "Natural Radioactivity in Man's Environment" Saratoga Springs, New York, October 11-13, 1976.

(8) Burke, G. de P., USERDA Health and Safety Laboratory HASL-289 (1975).

(9) Cameron, J.R., et al, "Thermoluminescent Dosimetry" The University of Wisconsin Press, 1968.

(10) Chan, F.K. y Burlin, T.E., Health Phys., 18, 325 (1970).

(11) Dekker, A.J., "Solid State Physics", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1962).

(12) Daniels, F., Symp. on Chem. And Phys. Radiat. Dosimetry, 1950. Technical Command, Army Chemical Center, Maryland.

(13) Geiger, E.L., et al, Ray-Ionisants, 4, 163 (1975).

(14) Gesell, F., et al, Health Phys., 30, 125 (1976).

(15) Gesell, F., et al, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-TM-4887.

(16) Halperin, A. y Braner, A.A., Phys. Rev., 117, 408 (1960).

(17) Hill, J.J. y Schwed, P., J. Chem. Phys., 23, 652 (1955).

(18) Herzberg, G., "Molecular Spectra and Molecular Structure" 2nd Ed., New York, D. Van Nostrand (1950).

(19) Klanses, H.E. y Wise, M.E., Nature, 158, 483 (1946)

(20) Kreyszig, E., "Introductory Mathematical Statistics" New York, John Wiley & Sons, Inc., 1970.

(21) Lowder, W.M., ed., Proceed. Second Workshop on the Natural Radiat. Environment, USAEC Report HASL-287 (1974). Citado en Report ORNL-TM-4887.

(22) Lushchik, Ch.B., Doklady Akad. Naak. SSSR, 101, 641 (1955).

(23) Muñoz Picone, E., Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM., 1970.

(24) Nink, R. y Kos, H.J., Phys. Stat. Sol., 35, 121 (1976).

(25) Pedraza, L.J., Reporte Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, México (1977).

(26) Piesch, E. y Burgkhardt, B., Proc. of 5th Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry Sao Paulo, Brasis (1977).

(27) Randall, J.T. y Wilkins, M.H.F., Proc. Roy. Soc. (London) A 184, 366 (1945).

(28) Richey, J.B., The Harshaw Model 2000 Thermoluminescence Analyzer (Harshaw Chemical Co.).

(29) Robertson, M.E.A. y Gilboy, W.B., Proc. of 4th Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry, Kraków, Poland (1974). pp. 691.

(30) Schayés, R., et al, Health Phys., 14, 251 (1968).

(31) Schulman, J.H., Paper SM-78/1. Symposium on Solid State and Chemical Radiation Dosimetry, IAEA. Vienna (1966).

(32) Schmidt, K., et al, Proc. of 4th Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry, Kraków, Poland. 1974. pp. 237.

(33) Shvarts, K.K., et al, Proc. of 4th Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry, Kraków, Poland. 1974. pp. 1.

(34) Spurny, Z., Atomic Energy Review, 3, 61 (1965).

(35) Swalin, R.A., "Thermodynamics of Solids", John Wiley, New York (1972).

(36) Willard, H.H., "Instrumental Methods of Analysis", D. Van Nostrand, Princeton, N.J. (1965).

(37) White, W.B., et al, "Use of the Harshaw Model 2000 for Thermoluminescence Analysis of Environmental Background Level Dose Measurements" (Harshaw Chemical Co.).

(38) Wolf, R.A. y Bowser, M.L., Rev. Sci. Instrum., 38, 1806 (1967).

(39) Yamashita, T., et al, Proc. of 2nd Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry, Gathlinburg (1968).

BIBLIOGRAFIA ESPECIAL PARA LOS CAPITULOS II y III

(1) Burke, G. de P. y McLaughlin, J.E., "Performance Criteria for Environmental Radiation Monitoring with TLD Systems", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-21, No. 1, 1974, pp. 444.

(2) Burke, G. de P. y Gesell, T.F., "Error Analysis of Environmental Radiation Measurements Made with Integrating Detectors", Proc. of Symp. on Measurements for the Safe Use of Radiation, Gaithersburg (Ed. by Fivozinsky, S.P.). National Bureau of Standards Special Publication 456, 1976, pp. 187.

(3) Cameron, J.R., Suntharalingam, N. y Kenny, G.N., "Thermoluminescent Dosimetry", The University of Wisconsin Press, 1968.

(4) Dixon, W.J. y Massey, F.J.,"Introduction to Statistical Analysis", McGraw-Hill Book Co, Inc. 1969.

(5) Geiger, E.L., Sánchez, E.A., Magne, J.C. y Durney, P., "La Dosimétrie par Thermoluminescence Appliquée a la Surveillance de L'environnement", Ray-Ionisants, 4, 163 (1975).

(6) Harley, J.H., ed. HASL Procedures Manual, USAEC Report HASL-300, ed. Revisada agosto de 1976.

(7) Robertson, M.E.A. y Gilboy, W.B., "Techniques for Reducing Systematic Errors in TLD Readers", Proc. of the 4th Internat. Conf. on Luminescence Dosimetry, Kraków, Poland, 1974, pp. 691.

Esta Tesis se Imprimió en Julio de 1978
empleando el sistema de reproducción Foto-Offset,
en los Talleres de Impresos Offsali-G, S. A., Av.
Colonia del Valle No. 535 (Esq. Adolfo Prieto),
Tels. 523-03-33 y 523-21-05 México 12, D. F

DE QUIMICA