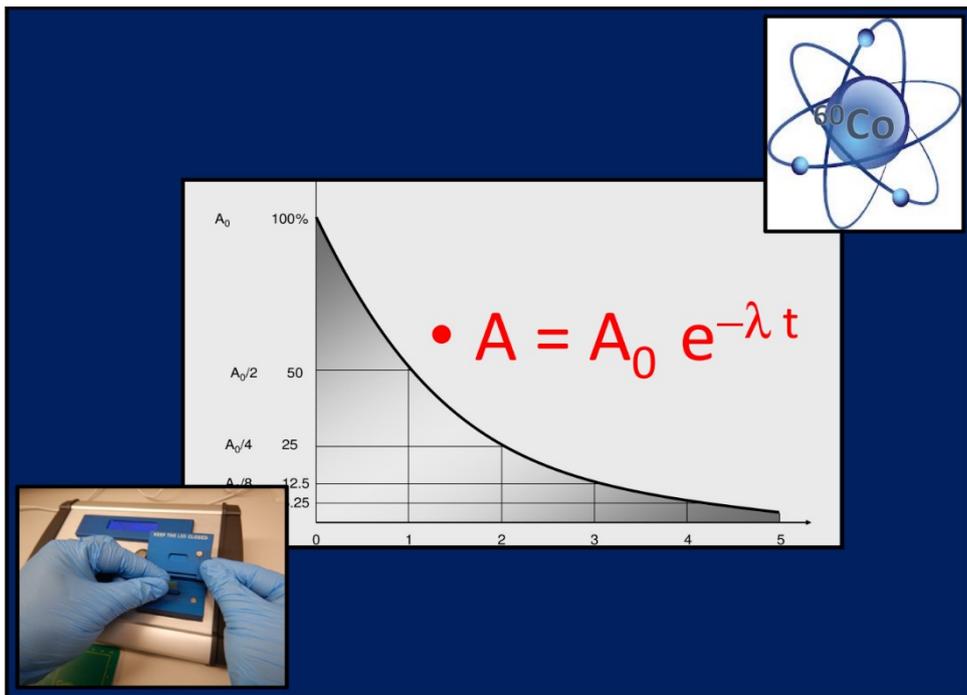




Joint FAO/IAEA Programme
Nuclear Techniques in Food and Agriculture

DOSIMETRÍA PARA LA TIE: PROCEDIMIENTO OPERATIVO ESTÁNDAR PARA EL SISTEMA DE DOSIMETRÍA DE PELÍCULAS GAFCHROMIC™ PARA RADIACIÓN GAMMA

Versión 1.0



Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Organismo Internacional de Energía Atómica
Viena, Austria, 2022

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

La mención de determinadas empresas o productos de determinados fabricantes en este documento no implica que la FAO / OIEA los apruebe o recomiende con preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

La forma correcta de citar este documento es:

FAO/IAEA. 2022. Dosimetría para la TIE: Procedimiento Operativo Estandar para el sistema de dosimetría de películas Gafchromic™ para Radiación Gamma v. 1.0, Andrew Parker, Kishor Mehta y Yeudiel Gómez-Simuta (eds.), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación/Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, Austria. 46 pp
<https://www.iaea.org/sites/default/files/22/02/gamma-sop-es-excel-embedded.pdf>

Dosimetría para la TIE
*Procedimiento Operativo Estándar para el sistema de dosimetría
de película Gafchromic™ para radiación gamma*

Contenido

PREFACIO.....	1
1. Introducción	3
2. Sistema de dosimetría.....	4
2.1. General	4
2.2. DoseReader 4	4
2.3. Dosímetro de película Gafchromic™ (HD-V2 y MD-V3).	11
3. confiabilidad a través de la trazabilidad	15
3.1. General	15
3.3. Condiciones de Irradiación de referencia	18
3.4. Dosímetro estándar de transferencia	19
3.6 Frecuencia de la medición de la tasa de dosis	21
4. Caracterización del sistema de dosimetría Gafchromic™	23
4.1. Calibración	23
4.2. Incertidumbre	30
4.3. Uso de la relación de calibración	31
5. Medición de la distribución de dosis (mapeo de dosis)	33
5.1. Objetivo	33
5.2. Procedimiento.....	33
5.3. Aplicación para investigación	33
5.4. Aplicación comercial.....	33
5.5. Ubicación de monitoreo de dosis	34
6. Control de proceso	35
6.1. General	35
6.2. Dosimetría de rutina	35
6.3. Monitoreo de los parámetros del proceso	35
6.4. Indicadores de Irradiación.....	35
7. Documentación.....	36
8. Referencias	37
9. Bibliografía.....	38
Standards	38
Apéndice A – Proveedores de dosímetros estándares de transferencia.....	39
Apéndice B – Dosis para pupas	41

PREFACIO

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) apoyan el desarrollo de la Técnica del Insecto Estéril (TIE) [1]. La TIE utiliza radiación para inducir esterilidad en los insectos criados en laboratorios los cuales pueden ser liberados en el campo para el control de una población plaga. La TIE ha sido empleada exitosamente contra varios insectos plaga por más de 40 años y está siendo desarrollada constantemente para nuevas plagas. La radiación ionizante como un medio de inducción de esterilidad tiene varias ventajas sobre la alternativa de esterilización química, y en la actualidad es usada universalmente en programas operacionales de manejo integrado de plagas en áreas amplias (AW-IPM) incorporando el componente de la TIE [2, 3]. Sin embargo, una incorrecta dosis de irradiación reducirá el impacto de los insectos liberados. El control de la dosis es por lo tanto importante en todos los estados del proceso desde la investigación inicial hasta el programa operacional y esto requiere un sistema de dosimetría seguro y confiable. Las especies objetivo para la TIE son típicamente las principales plagas que afectan a la agricultura o la salud humana, de tal manera que asegurar por medio de una dosimetría estandarizada que los insectos han sido adecuadamente irradiados es de crucial importancia para los productores, inspectores agrícolas, los oficiales de salud pública y el público en general [4].

La revisión de la literatura disponible indica que no existe un sistema de dosimetría de uso común para la TIE, y en realidad la dosimetría es a menudo descuidada por completo [5]. Hay una clara necesidad de un sistema de dosimetría que sea lo suficientemente simple de ser operado sin instalaciones especiales de laboratorio, que brinde adecuada precisión y que sea lo suficientemente barato para ser utilizado rutinariamente tanto para control de calidad también como investigación [6].

La selección de un adecuado sistema de dosimetría depende de varias consideraciones, incluyendo rango de dosis de interés, facilidad de medición, experiencia disponible, factores ambientales que pueden ser importantes en la localidad de uso, costo e incertidumbre [7] que sea consistente con el proceso [8, 9]. Considerando estos factores, el sistema de dosimetría GafchromicTM ofrece para los profesionales de la TIE y a los usuarios un medio relativamente simple, seguro y de bajo costo para medir la dosis absorbida [5]. El dosímetro es una película pequeña (1 × 1 cm cuadrado), delgada (~100 micrón) que cambia de color cuando es irradiada. Este cambio de color, el cual depende de la dosis absorbida, es posteriormente medido con un lector fotométrico. Este Manual describe la operación del equipo DoseReader4, pero cualquier lector fotométrico capaz de medir alrededor de 460 y 600 nm puede ser utilizado con apropiadas modificaciones al procedimiento. Como casi todos los sistemas de dosimetría, el desempeño del sistema GafchromicTM es afectado por factores ambientales, tales como temperatura y el tiempo de análisis. La calidad de la dosimetría y, por lo tanto, el éxito del proceso de esterilización dependen entonces de seguir rigurosamente los procedimientos descritos.

Este manual reúne en un documento una descripción de los componentes del sistema de dosimetría GafchromicTM, el procedimiento para su caracterización y su aplicación para la validación y el control de procesos [6], junto con las referencias a los estándares relevantes. Esto provee una fuente rápida de información disponible que puede ser accesada por los investigadores y los gerentes de las instalaciones de producción. Aunque este sistema de dosimetría puede ser utilizado para varios tipos de radiación, incluyendo electrones, los

procedimientos descritos aquí están limitados a la radiación gamma emitidos ya sea por ^{60}Co o ^{137}Cs [8]. Debido a una significativa diferencia en la energía de los fotones entre la radiación X de baja energía (150-225 keV) y la radiación gamma de ^{60}Co o ^{137}Cs , muchos procedimientos dosimétricos son diferentes [10]. Existe un documento complementario específicamente para la radiación X de baja energía [11]. También está disponible un manual complementario sobre el uso de la película Gafchromic TM para el mapeo de dosis mediante escaneo [12]. Este manual está disponible en el sitio web del OIEA junto con el archivo Excel asociado [13].

El Manual original del Sistema Dosimétrico por películas *Gafchromic*® para la TIE, fue desarrollado por el Dr Kishor Mehta bajo el contrato IAEA/2000CL9124 en 2004. Esta edición revisada fue desarrollada por Yeudiel Gómez-Simuta bajo el contrato TAL-NAFA20150922-001 y Andrew G. Parker bajo el contrato TAL-NAFA20210531-003. El personal miembro del IPLC responsable es Ms. Hanano Yamada

La mención de algún producto comercial o de alguna organización no constituye una recomendación por parte del OIEA.

1. INTRODUCCIÓN

Este documento se divide en tres partes:

La primera parte (Sección 2.- Descripción del sistema dosimétrico Gafchromic™) describe los dos componentes principales del sistema de dosimetría, llamados, dosímetros de película Gafchromic™ y el lector DoseReader 4. Esta parte, incluye información sobre el manejo de la película, su comportamiento de absorción óptica y magnitudes de influencia (parámetros ambientales) que afectan el desempeño de estos dosímetros de película. Asimismo, describe el procedimiento para la puesta en marcha y la operación óptima de rutina del lector

La segunda parte (Las secciones 3 y 4, Trazabilidad y Caracterización) describe los procedimientos para establecer la trazabilidad al sistema de medición internacional y para la caracterización del sistema de dosimetría. La caracterización incluye:

- La calibración del sistema dosimétrico,
- Determinación de la homogeneidad del lote y
- Determinación de la incertidumbre en la dosis medida.

La tercera parte (Secciones 5 y 6.- Uso del sistema dosimétrico para TIE), describe el uso de este sistema de dosimetría calibrado para irradiadores gamma probablemente para ser usados para irradiar insectos, ya sea para la investigación o propósitos comerciales. Revisa los procedimientos para llevar a cabo el mapeo de dosis para la validación y el control de procesos.

También hay una hoja de cálculo adjunta en formato Microsoft Excel disponible en la página WEB del OIEA [13], que contiene todos los formularios, con fórmulas para hacer los cálculos necesarios de forma automática (el archivo no contiene macros). Se incluyen breves instrucciones en una hoja dentro del libro de trabajo. Todos los formularios de datos para los procedimientos descritos en este documento se pueden imprimir desde el archivo Excel [13].

2. SISTEMA DE DOSIMETRÍA

2.1. General

El sistema dosimétrico se compone del Lector de dosis (DR4), las películas dosimétricas, Gafchromic™, la hoja de cálculo de Excel y los accesorios.

2.2. DoseReader 4¹

El Lector de Dosis 4 (DR4) es un densitómetro portátil, pequeño y de peso ligero usado para medir la respuesta de una película radiocrómica, tal como la película Gafchromic™ utilizada en este manual. El propósito es calcular la radiación para la esterilización en programas de insectos estériles y otras aplicaciones de irradiación de insectos. El rango de medición es de 1 mGy a 10 kGy dependiendo de la película utilizada.

El DR4 mide la densidad óptica (DO) de los dosímetros de películas radiocrómicas de 10 x 10 mm a dos longitudes de onda. Los resultados son automáticamente transferidos a la computadora usando una conexión USB, el cual también suministra energía al lector. Si no se necesita transferir datos de forma automática, el lector puede ser también energizado por medio de un suministro externo. Esto significa que el lector podría no estar conectado a la computadora.

El DR4 lee por defecto dos longitudes de onda, 458 nm y 590 nm (apropiado para la película Gafchromic™) pero esto se puede cambiar a otras combinaciones en la puesta en marcha y el fabricante puede pre-establecer otros valores a solicitud del usuario.

2.2.1. Componentes del Sistema

El sistema DR4 consiste en los siguientes componentes:

- Unidad (DR4)
- Suministro de Energía Externa
- Cable USB 2.0 A-B
- CD con software
- Filtros de Densidad Neutral con DO nominales de 0.5, 1.0 y 2.0
- Manual del Usuario y Servicio
- Estuche
- Pinzas para manejar de las películas

2.2.2. Estructura del sistema

El sistema se compone de 3 partes:

- El instrumento DR4 (incluyendo el hardware y software)
- El programa utilizado para transmitir los datos entre el DR4 y la PC
- Una computadora personal (PC)

Para instalar los controladores y el software, se necesitarán derechos de administrador en la PC.

2.2.3. Plataforma requerida

- PC con Windows 7 o posterior
- Conector USB 2.0 libre para la PC
- Cable A a B tipo USB para conectar el DR4 y la PC
- Disponible puerto COM en la PC (ver después)

¹ Supplied by Radiation General Ltd., 1118 Budapest, Sasadi út 36, Hungary. www.rad-gen.com

- Suministro de energía externo (opcional: se requiere una conexión externa únicamente cuando el DR4 no está conectado a una computadora)
- Programa de hoja de cálculo como Excel®
- Software **RGwedge** usado para transferir los datos desde el DR4 a la PC

2.2.4. Operación de Rutina para la Medición de la Densidad Óptica (DO)

Tan pronto como el DR4 se conecta a la PC (o cualquier suministro externo de energía), se enciende automáticamente. El DR4 no tiene botón de encendido por separado. Cuando se necesita reiniciar el equipo, esto se puede hacer desconectando y conectando de nuevo el cable USB o activando la opción conectar y desconectar del programa RGwedge. Para información detallada sobre la conexión del software del DR4 con la PC, favor revise el Manual del DoseReader 04.

Después de conectar el DR4 a la PC, el lector toma aproximadamente 5 minutos para estabilizarse. Cuando el DR4 se enciende, se escuchan tres sonidos y el panel LCD muestra el



Figura 1. Vista esquemática del DR4 al arrancar.

siguiente mensaje (Fig. 1):

Explicación de la pantalla:

- El número después de “Version” es el número de la versión del software.
- El número después de “S/N” es el número de serie del dispositivo
- El número después de “Typ” es el tipo de dispositivo:
 - 2T: modelo de dos colores
 - 4T: modelo de cuatro colores



Figura 2. Selección de la longitud de onda.

Después de varios segundos la pantalla cambia a la Fig. 2.

Si el botón "Select" no es activado en 5 segundos la opción mostrada es seleccionada. Para seleccionar diferentes longitudes de onda presione el botón debajo de "Select" (el botón FILM) y luego use el botón "Cycle" para moverse a través de las opciones, y active su elección con el botón "Select". Varias opciones están indicadas por el tipo de película (como en la figura GAF ND-HD), otras indican la longitud de onda de lectura ("E" para azul (458 nm), "G" para verde (522 nm), "A" para ámbar (585 nm) y "R" para rojo (625 nm)).

Una vez que la (s) longitud (es) de onda son seleccionadas (o se agota el tiempo) el DR4 envía el número de serie del dispositivo y los encabezados de columna que dan los colores de medición al puerto serie.

Importante: Antes de que comience la transmisión y el procesamiento de los datos de medición, inicie los siguientes programas:

- Abra el libro de Excel en la PC (para instrucciones por favor vea la hoja de instrucciones para el registro de datos en Excel y la sección 2.2.7)
- Inicie el programa de transmisión de datos, RGwedge.

Importante: asegúrese que el equipo DR4 esté conectado al puerto USB y esté operando antes de iniciar el programa (software) de transmisión de datos (RGwedge) de tal manera que el programa pueda identificar el puerto en el cual el DR4 está conectado. Inicie el programa RGwedge tan pronto como el lector DR4 arranque

Después de un tiempo corto el mensaje del DR4 aparecerá sobre la pantalla (Fig. 3).



Figura 3. Preparación para la medición del blanco.

Cuando este mensaje aparezca en la pantalla, asegúrese de que no hay ninguna película en la ranura, cierre la tapa presione cualquiera de los dos botones.

PRECAUCIÓN: NO ABRA LA TAPA, mientras este en progreso la medición del blanco. Si se hace, el dispositivo tendrá que ser reseteado.

La medición del valor del blanco puede ser repetida en cualquier momento durante el proceso de medición presionando el botón BLANK (izquierdo) del lector. Sin embargo, tenga en mente que el nuevo valor del blanco será usado a partir de ese punto.

El DR4 intenta detectar la presencia de una película en el lector y puede mostrar un mensaje de advertencia (Fig. 4). Si hay una película, presione el botón "N" (derecha), retire la película y cierre la tapa, luego presione el botón "Y" (izquierda). La pantalla se pone en blanco hasta que finaliza la medición.



Figura 4. Mensaje de Película detectada.

PRECAUCIÓN: Este mensaje también puede ser mostrado inclusive si la película ha sido removida o si el botón de la izquierda del DR4 ha sido presionado con una película adentro (previniendo la toma automática de lectura en blanco) y la temperatura ha cambiado

significativamente. Si el usuario insiste en aceptar la medida como blanco (presionando el botón de la izquierda) cuando una película esta insertada, conducirá a resultados impredecibles.

Si el cambio de temperatura excede un umbral, la medición de un blanco es forzada. Esto puede suceder en modo automático si las películas se insertan una tras otra y no hay oportunidad de medir un blanco (Fig. 5).



Figura 5. Lectura en blanco forzada

Si el botón identificado como FILM (botón derecho) es presionado cuando no hay valor de blanco disponible, la pantalla “Measure blank!” aparece. Esto pasa cuando el DR4 se forzó a una medición en blanco debido al cambio de temperatura pero el usuario presiona el botón FILM (Fig. 5).

Cuando el lector se maneja correctamente, comienza la medición del blanco y aparecerá un mensaje en la pantalla (Fig. 6). Un símbolo en la esquina inferior derecha indicará el progreso de la medición. Cuando el símbolo disminuye de arriba hacia abajo, se mide el primer color, cuando el símbolo disminuye de abajo hacia arriba, se mide el segundo color y así sucesivamente para obtener más colores.



Figura 6. Mensaje de medición del blanco

Cuando finalizan las mediciones del blanco, suena una alarma y se muestra un mensaje (Fig. 7). Las letras en el lado izquierdo de la pantalla son las primeras letras de los colores de medición (B para azul y A para ámbar).



Figura 7. Valores del blanco. A = ámbar (590 nm); B = azul (458 nm); la temperatura está en Celsius.

Los números que siguen a las letras son los valores de medición en blanco y el número en la esquina superior derecha es la temperatura dentro del cabezal del lector en grados Celsius. Si más de dos longitudes de onda están siendo leídas, estas aparecerán a la derecha y la temperatura no será mostrada. Las mediciones en blanco no se envían al puerto serial.

Si no se presiona ningún botón y no se abre la tapa, el DR4 repetirá la medición en blanco aproximadamente cada 20 segundos y la pantalla se actualizará. Sonará una alarma al final de cada medición. Si el DR4 entra en un estado en el que no mide correctamente el blanco, se puede forzar una lectura en blanco presionando el botón BLANK cuando no hay ninguna operación de lectura en curso.

2.2.5. Medición de películas irradiadas

Después de medir el valor en blanco, se pueden iniciar las mediciones de la Densidad Óptica de películas irradiadas. Asegúrese que la temperatura de la película ha alcanzado la temperatura del cuarto. La película debe ser insertada verticalmente en la ranura, tal y como se ve en la Fig. 8



Figura 8. Inserción de la película Gafchromic en el DR4. La película debe ser manejada con guantes o pinzas

El DR4 opera automáticamente. El usuario simplemente inserta las películas y cierra la tapa. El

DR4 reconoce la presencia o ausencia de la película. En ausencia de una película, se mide el valor en blanco. Cuando hay una película en la ranura, se mide el valor de la película. Es aconsejable dejar que el dispositivo mida el valor en blanco entre la medición de dos valores de película. La densidad óptica se calcula como:

$$\log_{10}(I_0/I)$$

I_0 = el valor de la densidad del blanco

I = valor de la densidad no-blanco

El DR4 transmite la densidad óptica de los dos colores y la temperatura a la PC a través del programa RGwedge. Los campos están separados por caracteres de tabulación (TAB) y la temperatura va seguida de un caracter de retorno.

ADVERTENCIA: ¡Es muy importante tener la hoja de Excel aceptando los datos de medición seleccionados durante todo el proceso de medición! La ventana de Excel debe ser la ventana activa y se debe seleccionar la celda que va a aceptar los datos. No cambie a otras tareas mientras la medición está en curso y no mueva el cursor.

Excel debe configurarse correctamente (para obtener instrucciones, consulte 2.2.7. Libro de trabajo de Excel para grabación de datos, etc.) para mover el cursor cuando lleguen caracteres especiales del DR4. El cursor debe moverse horizontalmente a la siguiente celda cuando llega un caracter de tabulación y el cursor debe moverse a la siguiente línea cuando llega un caracter de fin de línea (CR / LF). Esta es la configuración predeterminada

Algunos principios que aplican para todas las mediciones:

1. El DR2 mide únicamente cuando la tapa está cerrada.
2. El final de una medición exitosa es señalado por un sonido largo. Una medición es exitosa si no es interrumpida abriendo la tapa.
3. Si la tapa se abre mientras una medición está en progreso, la medición se interrumpe y el dato es ignorado.
4. Los botones BLANK y el de FILM son activados únicamente cuando no hay medición en proceso.
5. La pantalla LCD será actualizada después de cada medición exitosa.
6. Si una película es dejada en la ranura, el valor medido de la película será transmitido una sola vez a la PC. (si la tapa es abierta y cerrada sin remover la película e insertar una nueva o la tecla FILM es presionada, el DR4 transmitirá el próximo valor medido nuevamente).
7. Si el DR4 no está conectado a una PC los resultados de las mediciones aparecerán únicamente en la pantalla del equipo.
8. La lectura del valor de la DO de la película cambia con la temperatura. Si la película ha sido mantenida en un lugar a una temperatura diferente del DR4, permita que la película alcance la misma temperatura que el DR4 antes de iniciar las lecturas.

Como se mencionó en la sección previa, si las mediciones se realizan correctamente, los datos aparecerán en la pantalla (Fig. 9).



Figura 9. Valores de DO de la película

Las letras sobre el lado izquierdo de la pantalla son las primeras letras de los colores en medición. En este caso A es para ámbar (590 nm) y B para azul (558 nm). Los números seguidos de las letras son los valores de DO y los números en la esquina superior derecha es la temperatura en grados Celsius. Si más de dos colores están siendo leídos, estos aparecerán a la derecha de la pantalla y la temperatura no será mostrada pero será transmitida a la PC.

Los valores de DO medidos y la temperatura son transmitidos automáticamente a la PC. Valores erróneos de DO deben ser borrados sobre la PC. Después de borrar, el cursor debería ser colocado en la celda donde el próximo valor de DO es esperado.

PRECAUCION: Si el cursor es colocado en una celda donde ya contiene un dato, el dato será sobrescrito en esa celda y las dos celdas a la derecha (o más si más de dos colores están siendo leídos).

Como se mencionó en la sección previa, “Operación de Rutina para la Medición de la Densidad Óptica (OD), si el botón no es presionado y la tapa no es abierta, el DR4 repetirá la medición de la película cada 20 segundos y la pantalla se actualizará. Un “sonido” largo se escucha al final de cada medición. Únicamente el resultado de la primera medición será transmitido automáticamente. Si se requiere una segunda lectura de la misma película, presione el botón FILM para enviar el dato al puerto serial. Para quitar la señal de sonido, mantenga presionados ambos botones (BLANK y FILM) cuando inicie el DR4.

2.2.6. Verificación de operación del lector

El DR4 es suministrado con un juego de filtros neutrales (ND) para verificar la operación del lector. La DO nominal de las películas es 0.5, 1.0, y 2.0, pero el valor real de la DO puede ser algo diferente de los valores nominales pero estables todo el tiempo. La lectura de DO de los filtros neutrales debe ser tomada al inicio y al final de cada sesión cuando use el DR4; los valores de cada filtro ND no deben diferir entre sesiones o durante una sesión en más de 2-3 en el último decimal. Mantenga un registro de las lecturas del filtro ND para confirmar el continuo funcionamiento correcto del DR4.

2.2.7. Libro de Trabajo de Excel para Registro de Datos.

Un Libro de Trabajo de Excel está disponible diseñado para simplificar la captura de los datos de dosimetría usando un lector de películas radiocrómicas “DoseReader”. El libro de trabajo contiene once hojas, seis de las cuales son para el procedimiento de calibración (CalData y formatos SIT-1 a SIT-5), tres para dosimetría de rutina (SIT-6, -7 y -8) y uno para resumir las características del sistema de dosimetría

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Data entry form							
2	Use this form to collect readings automatically from a DoseReader film reader							
3	Place cursor in yellow cell before starting the DoseReader							
4	Start here>		S/N: 12348	Date read:				
5	Film type		GAF MD-HD	Operator:				
6	Colour		Amber	Blue	Lot No.:			
7	Target	Wavelength	590nm	458nm				
8	Dose	Film	OD	OD	Temp C			
9		ND0.5	0.4847	0.5634	24.9	0.4847	0	0
10		ND1.0						
11		ND2.0						
12	0	1				0	0	SIT
13	(Background)	2				0	0	

Figura 10. Formato de entrada de datos con el encabezado y la lectura del primer filtro neutral ND. El DR4 debe ser iniciado como se muestra y el cursor colocado en la celda amarilla brillante (C4).

(TIE-9) y una para corregir el tiempo de lectura diferente a las de 24 horas (tiempo). Existe también una hoja que contiene instrucciones simplificadas. La hoja de Excel calcula la relación entre la respuesta y la dosis aplicada para regresiones lineales, cuadráticas y de series de potencia contra ya sea la dosis o log (dosis), seleccionable en la hoja SIT-4D.

Estas instrucciones asumen el uso de esta hoja de cálculo. Esta hoja de cálculo está disponible en la IPCS (Insect Pest Control Section por sus siglas en inglés). Si se desea, la hoja de cálculo en blanco puede ser impresa como formatos y registrar los datos y realizar los cálculos.

Cuando el DR4 se inicia (como se describe anteriormente), el cursor debe colocarse en la celda de color amarillo brillante (C4 en este ejemplo) para capturar los datos en las celdas correctas (Fig. 10). Todas las películas de calibración deberán ser preparadas y leídas en secuencia en la hoja CalData. Las celdas de color amarillo pálido de datos adicionales, requieren de entrada manual

2.2.8. Aviso sobre Excel:

La entrada de un dato en una hoja de Excel puede ser controlado de varias maneras. El movimiento por default del cursores es hacia abajo, pero este puede ser cambiando hacia arriba, a la izquierda y hacia la derecha en archivos, opciones, avanzadas, menú de opciones de edición (en Excel 2003 o 2010). Los datos pueden también ser introducidos dentro de un rango de celdas, sombreando el rango. El primer valor ira hacia arriba a la izquierda de la celda y luego bajara la columna (si el movimiento por default es hacia abajo) o a la derecha de la línea (si el movimiento por default es a la derecha) luego continua arriba de la próxima columna o iniciando en la próxima línea

2.3. Dosímetro de película Gafchromic™ (HD-V2 y MD-V3).

2.3.1. Descripción

La película HD-V2 consiste en dos partes, la capa activa y el sustrato de poliéster. La capa activa es de 8µm de gruesa y consiste en el componente activo, el colorante marcador, el estabilizador, el estabilizador y otros componentes responsables de la reacción de la película a la radiación. El sustrato de poliéster es de 97µm de grueso y tiene una consistencia clara. Dependiendo del lote, el grosor del sustrato de poliéster puede variar.

Debido a la sección transversal asimétrica de la película Gafchromic™ HD-V2, la respuesta del escáner o el densitómetro puede variar. Viendo la película en ambos lados, usted puede notar que un lado es brillante (lado laminado), mientras que el otro lado (lado activo) no lo es. Usando cualquier lado es aceptable. Sin embargo, con el fin de tener mediciones consistentes, lo mejor es medir las películas siempre del mismo lado.

Con el fin de distinguir el lado activo y el lado laminado existe una pequeña ayuda. La hoja de película Gafchromic™ HD-V2 tiene una pequeña ranura cerca de una esquina. Cuando la película se encuentra en una posición horizontal con la ranura en la esquina superior derecha, el lado activo de la película se encuentra frente a usted.

La siguiente tabla muestra en detalle las especificaciones de la película

Tabla 1: Estructura y composición de la película¹ Gafchromic™ HD-V2

Material	Grosor (microns)	Densidad (g/cm ³)	Composición (atom%)			
			C	H	O	N
Base de Poliéster de la película	97	1.35	45.5	36.4	18.2	0
Capa activa	8	1.08	31.5	56	5	7.5

¹Suministrado por Ashland, Bridgewater, NJ.

La película Gafchromic™ MD-V3 es químicamente idéntica pero tiene una capa activa de 20 µm entre dos hojas de 97µm de poliéster. La película es, por lo tanto simétrica y puede ser usada de cualquier forma. La película MD-V3 es usada para dosis de 1 - 100 Gy pero es mejor hasta aproximadamente 50 Gy. Mientras que la película HD-V2 es adecuada para 10 – 100° Gy. Ambas películas MD-V3 o HD-V2 pueden ser utilizadas con este manual.

2.3.2. Espectro de absorción

El espectro de absorción para el material del dosímetro Gafchromic™ para las longitudes de onda de relevancia (400 – 700 nm) se muestran en la Fig. 11 para películas no irradiadas y también para películas irradiadas a varias dosis [12]. La longitud de onda a ser usada en la presente aplicación es de 590 nm. Las variaciones en el grosor de la capa activa causa variaciones en la respuesta de la película. La capa activa incorpora un colorante amarillo débil. Al mismo tiempo midiendo la densidad de la película en la parte azul del espectro (458 nm) proporciona una estimación del espesor de la capa activa que se puede utilizar para corregir la respuesta.

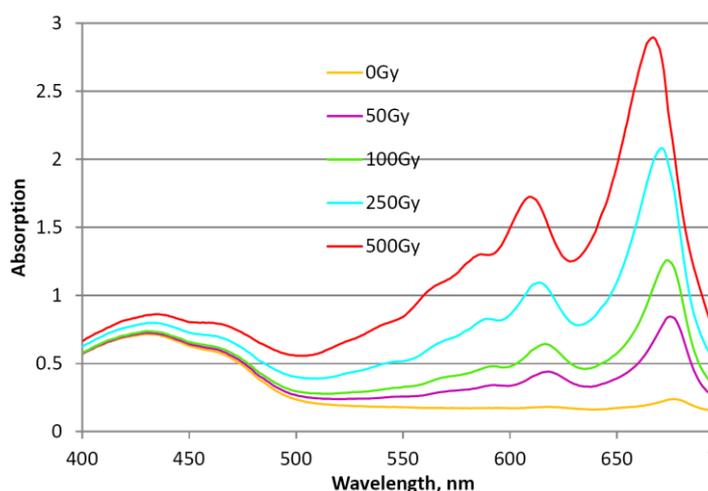


Figura 11. Espectro de absorción de la película Gafchromic™ HD-V2 a varias dosis.

2.3.3. Respuesta

La respuesta, en este Manual, significa la diferencia en la DO entre una película expuesta y una NO irradiada.

La película es amarillenta y transparente antes de la irradiación y se vuelve verde casi instantáneamente después de la exposición a la radiación ionizante. La intensidad del color verde (DO) está en función de la dosis de radiación. Sin embargo, la densidad óptica (DO) de la película incrementa ligeramente con el tiempo (se profundiza el color verde), después de la exposición; la tasa de cambio disminuye con el tiempo. Después de 24 horas el valor de la DO llega a ser relativamente estable a

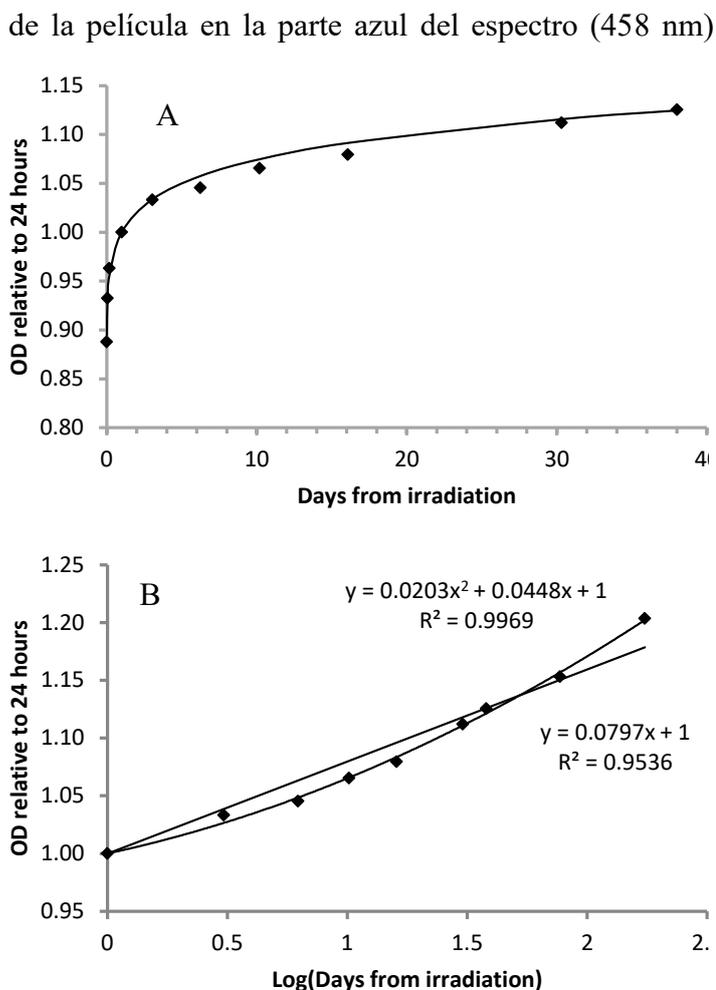


Figura 12. Cambio en la DO de la película Gafchromic™ HD-V2 con el tiempo. A: tiempo lineal hasta 38 días; B: Log(tiempo) para 174 días

aproximadamente 12 % sobre su valor inicial (medida a unos pocos minutos después de la exposición). Este comportamiento es ilustrado desde recién irradiado hasta 38 días después en la Fig. 12A para una dosis acerca de 100 Gy (datos de los laboratorios de Seibersdorf), con una DO final de aproximadamente 12.5% más alta que el primer día. La relación entre la DO y el tiempo es casi logarítmica (Fig. 12B y el ajuste cuadrático proporciona una aproximación cercana a los puntos de datos. Se proporciona una hoja (Tiempo) en el libro de Excel para corregir la lectura de DO desde cualquier momento hasta más de 100 días para la lectura a las 24 horas. Siga las instrucciones de la hoja de cálculo, pero debe reconocerse que esto agregará incertidumbre adicional al resultado general.

Nota: Si las muestras son irradiadas en un ambiente de oxígeno reducido (nitrógeno, hipoxia o anoxia), la calibración debe ser hecha en nitrógeno, hipoxia o anoxia, o el dosímetro colocado en una ubicación de referencia fuera del contenedor en aire ordinario.

2.3.4. Luz UV

No hay medidas extremas para ser tomadas para proteger la película dosimétrica contra los rayos UV. Sin embargo, no exponga las películas a la luz directa del sol y manténgalo expuesto a luz de habitación (especialmente luz fluorescente) al mínimo requerido para manejar las películas y para la medición. Almacene la hoja de las películas en su sobre y en un lugar oscuro cuando no esté en uso.

2.3.5. Dependencia de la Temperatura

La DO de la película dosimétrica irradiada (para una misma dosis) varía poco con la temperatura en el momento de la irradiación en el rango de 5 a 40 °C [14]. Por encima de ese rango, la variación máxima es de aproximadamente $\pm 2\%$, la cual normalmente es menor que la incertidumbre en el sistema dosimétrico, pero el efecto de la temperatura parece variar con la dosis y la longitud de onda de lectura. Por lo tanto, se recomienda que para exposiciones dentro de $\pm 5^\circ\text{C}$ de la temperatura de calibración que no se requiera corrección, pero para diferencias superiores a $\pm 5^\circ\text{C}$, se construya una calibración separada a la temperatura relevante.

La dependencia de la densidad óptica sobre la temperatura del dosímetro durante su lectura fue determinada por Li *et al.* [15] para una primera versión de la película. Sin embargo, estos efectos a menudo varían de un lote a otro. Algunos experimentos limitados realizados en el Laboratorio del OIEA indican que el coeficiente de temperatura de lectura es de aproximadamente $0.7\%/^\circ\text{C}$ para un lote de dosímetros en un rango de temperatura ambiente de 20 a 25°C. Debido a esto, es esencial que la temperatura ambiente de la habitación donde se encuentra el lector se mantenga bastante constante durante todo el año.

2.3.6. Manejo

Maneje la película con un par de pinzas (preferiblemente con puntas finas) o con guantes con el fin de no dejar huellas digitales en la película (Fig. 8). Huellas dactilares, arañazos en la superficie de la película, la suciedad o el polvo pueden afectar la absorción de la luz de la película. Además, las puntas de las pinzas deben tocar solamente los bordes de la película, lejos de la parte central, donde atraviesa el haz de luz para el análisis.

La película dosimétrica se compra en forma de hoja (aproximadamente de 20 x 25 cm para HD-V2, y de 12.5 x 12.5 para MD-V3). Sin embargo el tamaño que puede ser acomodado en el porta-dosímetro es acerca de 1 x 1 cm, y por lo tanto, la película debe ser cortada a este

tamaño antes de tomar las lecturas. La película puede ser cortada con una guillotina para papel o una navaja afilada (o simplemente con una navaja de rasurar) y una regla de plástico. En adición a esto, usando un cortador rotatorio de papel se logrará los mismos resultados con menos esfuerzo y mayor precisión (pero se deberá tener cuidado cuando se use un cortador rotatorio para las películas GafchromicTM MD-V3).

Es conveniente medir el tamaño correcto colocando la hoja de la película sobre un papel cuadriculado o pieza de soporte mientras se corta. Use guantes delgados desechables para esta actividad evitando dejar huellas dactilares sobre la película (Fig. 13). Para facilitar la colocación de la película dentro de DR4, la película puede ser cortada ligeramente más pequeña, aproximadamente 0.9 x 0.9 cm. Almacene la hoja sobrante en su sobre cuando no esté en uso. No almacene la hoja por mucho tiempo en el cuarto donde se encuentra el irradiador

Use un pequeño sobre de papel para almacenar cada dosímetro de película. Coloque el dosímetro en el sobre y retírelo sólo para la medición de la DO. *Se recomienda irradiar el dosímetro en el sobre* cuando se coloca en el contenedor con pupas para mantener el dosímetro libre de polvo u otra contaminación. También, registre en el sobre información relevante para su identificación, tales como la identificación del dosímetro, la ubicación de irradiación, el tiempo de exposición, las condiciones y la fecha de la irradiación. No escriba en el sobre con la película en el interior, ya que esto puede marcar la película.



Figura 13. Un cuchillo afilado, una regla de plástico y una rejilla debajo de la película ayudan a cortarla convenientemente en longitudes deseables.

2.3.7. DO de fondo (blancos)

Mida el valor de DO de la película no irradiada para cada lote de dosímetro. Corte 10 dosímetros de la hoja de dosímetros. Mida la DO de cada dosímetro siguiendo el procedimiento de la Sección 2.2.5.

Si el lote dura más de 6 meses, esta medición debe repetirse y el valor de DO (fondo) actualizado.

3. CONFIABILIDAD A TRAVÉS DE LA TRAZABILIDAD

3.1. General

La confiabilidad de la medición de la dosis utilizando el sistema de dosimetría Gafchromic™ depende principalmente de:

- 1) Seguir consistentemente el procedimiento descrito en este documento, y
- 2) Tener la medición de la tasa de dosis en un punto de referencia que sea comparable a un estándar nacional o internacional reconocido

La trazabilidad es la capacidad de demostrar por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones que todas tienen incertidumbres declaradas, conocida como “cadena de trazabilidad”, que una medida está de acuerdo a los límites aceptables de incertidumbre comparada con reconocidas normas nacionales o internacionales. Por lo tanto, dicha trazabilidad para la tasa de dosis en un punto de referencia se logra midiéndola con un dosímetro estándar de transferencia que sea trazable a estos estándares. El dosímetro estándar de transferencia más utilizado es la Alanina; para obtener una lista de posibles proveedores, consulte el Apéndice A (consulte la sección 3.4). Se pueden usar otros dosímetros adecuadamente calibrados, como una cámara de iones, de Fricke, pero estos están fuera del alcance de este manual.

Si hay más de un irradiador disponible, seleccione uno que provea el lugar más conveniente para irradiar los dosímetros y donde la temperatura pueda ser controlada o medida más fácilmente. El sistema de Dosimetría Gafchromic™ será entonces calibrado irradiando los dosímetros a varios niveles de dosis en un punto de referencia. Una vez que el sistema dosimétrico es calibrado estará listo para ser usado dondequiera con casi cualquier tipo de irradiador con energía fotónica equivalente.

Este proceso es registrado usando una hoja de cálculo de Excel disponible de IPCS.

Nota: Una calibración Gafchromic™ realizada en un irradiador de Cobalto-60 puede ser usada para un irradiador de Cesio-137 y vice-versa, pero no puede ser utilizada para rayos-X de baja energía (hasta 300 kVp). De la misma manera, una calibración realizada para Rayos-X de baja energía no puede ser usada para ^{60}Co o ^{137}Cs .

3.2 Campo de radiación de referencia

Cuando los rayos gama del Cobalto-60 chocan con un contenedor de insectos en la cámara de irradiación, muchos de los fotones- γ (1.2 MeV) atraviesan. Algunos fotones interactúan con el material del contenedor y los insectos, desalojando electrones de alta energía. Cada uno de estos a su vez desaloja en cascada varios electrones de baja energía, Por último, la energía de los electrones en la cascada cae por debajo del nivel biológicamente activo (aproximadamente 100 eV). En cada punto donde un electrón es desalojado, un enlace molecular puede ser roto, incluyendo daños en el ADN de los cromosomas causando esterilidad. Como las γ -gama interactúan con el material a diferentes profundidades, las cascadas de cada uno se traslapan, permitiendo la creación de un nivel de equilibrio de electrones biológicamente activos (superior a 100 eV) a una distancia dentro del material que depende de la energía del fotón y densidad, conocida como la distancia de equilibrio de electrones. El equilibrio depende de la

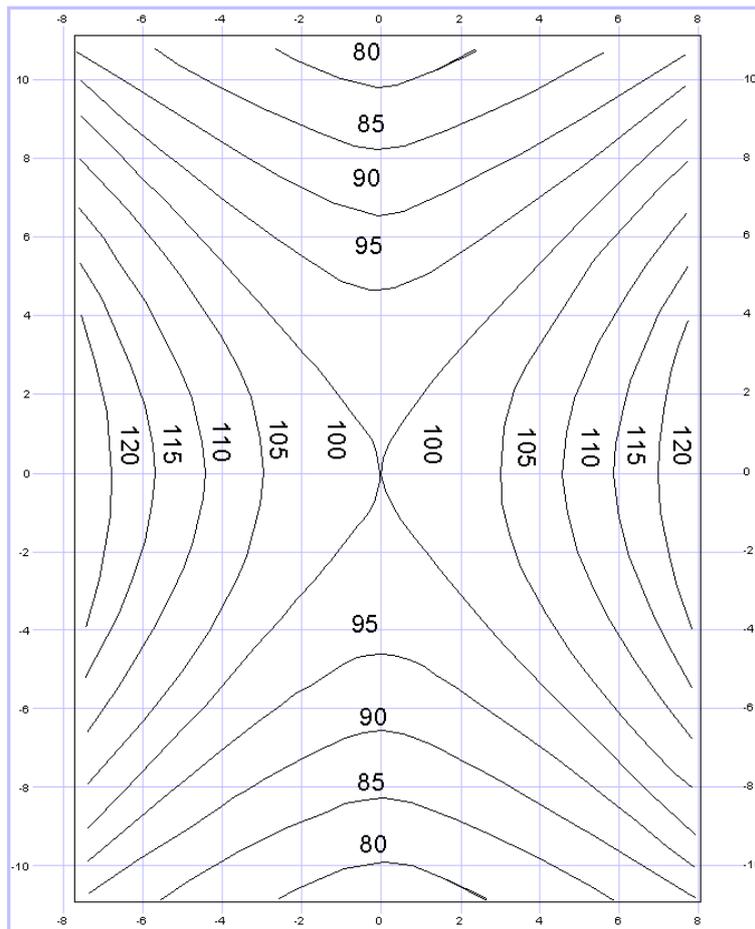


Figura 14. Distribución típica de la tasa de dosis en la cámara de irradiación de un Gammacell-220 de Nordion. Los valores están normalizados a 100 en el centro del campo gamma. Note que el campo es más uniforme en el centro. (La cuadrícula está en intervalos de 2 cm del centro de la cámara). Extraído de los datos de Nordion.

densidad y composición atómica del material a través del cual pasa la radiación, por lo que diferentes materiales producirán diferentes equilibrios. Para estandarizar el informe de dosimetría, la dosis siempre se expresa como dosis en agua, es decir, en un campo de electrones equilibrado producido por agua o material equivalente. Ver también el Apéndice B para una discusión de la dosis al aire, la dosis al agua y la dosis a las pupas.

Tanto los dosímetros durante la calibración como los insectos durante la irradiación deben ser rodeados por suficiente material de composición atómica y densidad adecuadas (build-up material) para garantizar que se establezca un equilibrio de electrones equivalente al agua antes de que la radiación alcance la muestra o el dosímetro, ya que es este campo de electrones que causa primeramente la ionización. Si no se hace esto, la superficie de la muestra puede recibir significativamente una dosis mayor o menor de la esperada. Para el ^{60}Co la distancia de equilibrio es acerca de 4 mm en agua o plástico tal como PMMA, y esta cantidad de material debe proporcionarse alrededor de cada dosímetro y muestra a irradiar.

Hay dos tipos principales de irradiadores que son usados para la TIE, tanto para investigación como para irradiación comercial. Para ambos tipos, es importante que la dosis sea tan uniforme como sea posible en el punto de referencia donde la tasa de dosis será establecida y posteriormente donde los dosímetros Gafchromic™ son irradiados para calibración.

Irradiadores autoblandados: En este caso, los lápices de fuentes radiactivas se disponen generalmente a lo largo de la circunferencia de un cilindro y la muestra a irradiar se coloca dentro de este volumen cilíndrico. Para tal caso, la muestra/dosímetro recibe radiación desde todas las direcciones y por lo tanto el campo de radiación en el centro de este volumen es bastante uniforme. Los irradiadores tipo Gamacell de Nordion y Sheppard y el Husman entran en esta categoría. La Fig. 14 muestra una distribución de tasa de dosis típica en aire en la cámara de irradiación de un Gammacell-220 de Nordion. Los nuevos modelos de irradiadores autoblandados tal como el Foss Therapy Services Model 812, tiene los lápices de fuentes sobre un lado del contenedor de muestras cilíndrico el cual rota en su propio eje durante el proceso de irradiación. En este caso la muestra/dosímetro recibe radiación sobre la superficie completa del contenedor pero las tasas de dosis en las orillas del recipiente es más alta que en el centro.

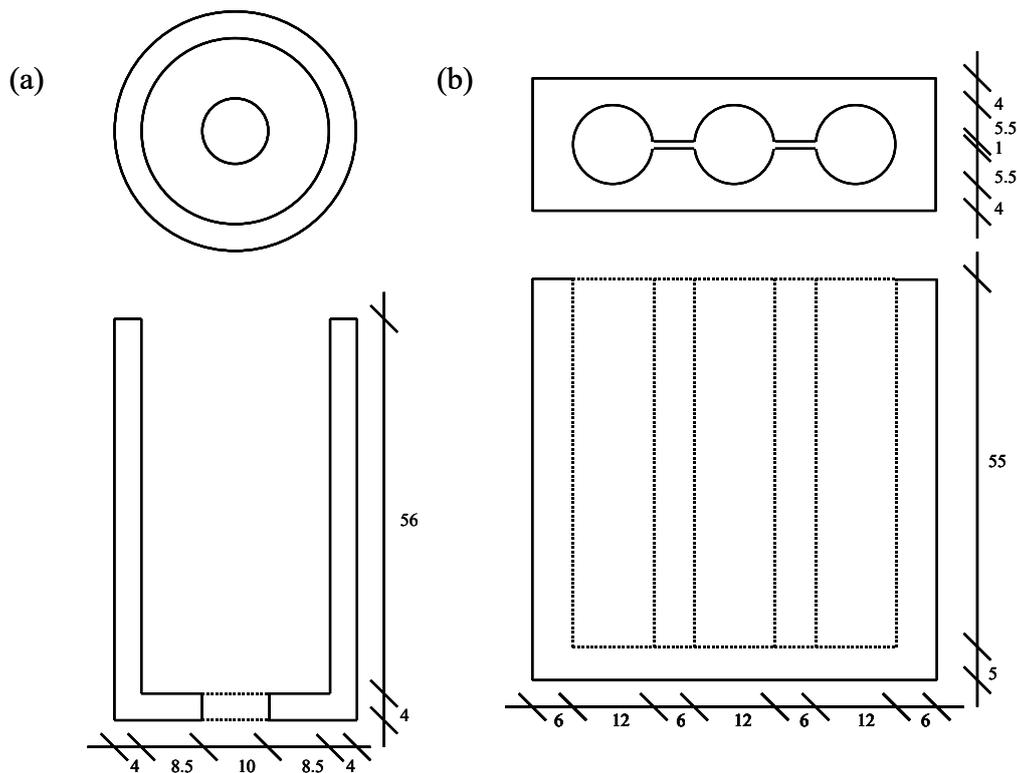


Figura 15. Dos portadosímetros diseñados para usarse con diferentes tipos de irradiadores. El material recomendado es PMMA. (a) Para Irradiadores autoblandados, note el agujero en el fondo que facilita la circulación natural del aire; (b) para irradiadores panorámicos. Las dimensiones están en mm.

Irradiadores panorámicos: La fuente generalmente consiste en varios lápices radiactivos dispuestos en un plano o como una sola barra. Para la irradiación de rutina, la muestra puede ser colocada estacionariamente frente de la fuente, o pasar alrededor de la misma. Para este tipo de irradiadores, la muestra recibe la radiación de un solo lado a la vez. La uniformidad espacial de la dosis para una muestra estacionaria puede mejorarse ya sea rotándola continuamente durante el proceso de irradiación o girándola 180° después de haber transcurrido la primera mitad del tiempo total de irradiación.

3.3. Condiciones de Irradiación de referencia

3.3.1. Geometría de Irradiación

La colocación de los dosímetros en el punto de referencia fijo (dentro del campo de radiación de referencia) debe ser consistente para lograr resultados reproducibles. Esto se puede lograr por (i) usando un soporte de dosímetro especialmente diseñado, y (ii) disponiendo un conjunto de marcas de referencia en la cámara de muestras del irradiador de manera que el porta dosímetro se pueda colocar exactamente en la misma posición cada vez.

Irradiadores autoblandados: La figura 15a y 16a muestran un soporte dosímetro diseñado específicamente para este tipo de irradiador. Está hecho de PMMA (cualquier material polimérico es aceptable, excepto los halogenados) y es un cilindro abierto (como una taza) con el diámetro interior (~ 26 mm) lo suficientemente grande como para acomodar tres dosímetros, siendo cada uno de aproximadamente 12 mm de diámetro. El espesor de pared (4 mm) del soporte está seleccionado para proporcionar la cantidad óptima de material para lograr el equilibrio de electrones para rayos gamma de ^{60}Co . Este diseño estándar se recomienda para su uso en todos los irradiadores Gammacell-220. Un soporte de este tipo también se puede utilizar para irradiadores Husman que contienen ^{137}Cs mediante la modificación de la base del diseño para encajar dentro de la cámara de exposición. Para ambos tipos de irradiadores, el soporte del dosímetro debería estar ubicado en la cámara de irradiación de modo que los dosímetros están en el centro del campo de radiación, donde la tasa de dosis es más uniforme (Fig. 14). Además, debe estar disponible algún método para que éste soporte esté siempre en la misma ubicación en el campo de referencia; Las Fig. 17 y 18 muestran un soporte estándar diseñado para el Gammacell-220. Para la irradiación en un Gammacell-220, coloque este soporte en la cámara de irradiación y luego coloque el soporte de dosímetros de la Fig. 16^a de forma segura en la parte superior de esta. Esto asegura que los dosímetros colocados en el soporte están siempre en el mismo lugar en el campo de radiación, y si las dimensiones son correctas el centro de los dosímetros está en el centro del campo de radiación.

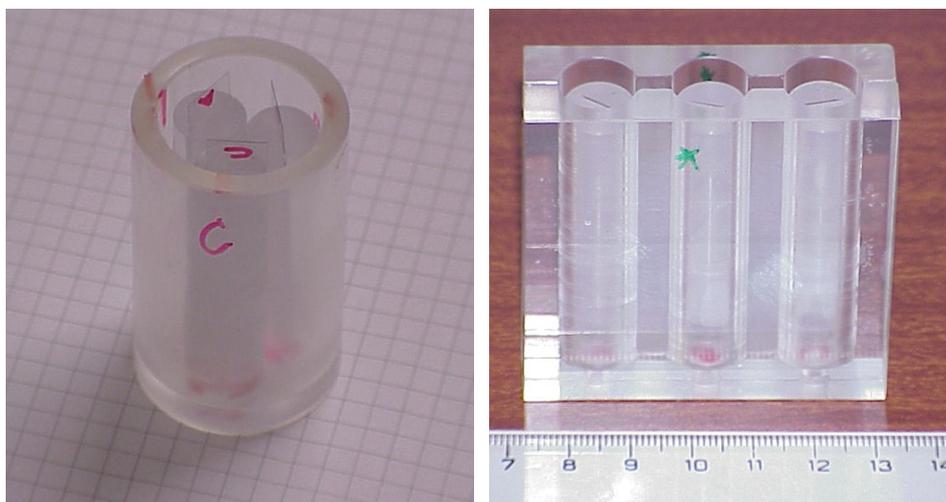


Figura 16. Dos tipos de porta-dosímetros para acomodar tres dosímetros para irradiación simultánea: (a) Este tipo cilíndrico (copa abierta) es adecuado para irradiación en irradiadores autoblandados como el tipo Gammacell y el tipo-Husman, donde la fuente gamma rodea a los dosímetros y el campo es isotrópico, y (b) este es un portadosímetro plano adecuado para irradiadores panorámicos los cuales tiene una fuente plana o de varillas y el campo gamma es unidireccional. Estos soprtes estan hechos de PMMA.

Irradiadores panorámicos: A pesar de que la muestra (contenedor pupas) puede estar moviéndose frente de fuente en una irradiación de rutina, puede ser necesario en algunos casos que los dosímetros estén estacionarios para la medición de tasa de dosis y también para la irradiación de calibración (Sección 4.1). Las figuras 15b y 16b muestran un soporte dosimétrico diseñado específicamente para este tipo de fuentes. Generalmente, éste debe estar colocado aproximadamente a la misma distancia de la fuente en la que la muestra es colocada durante un proceso de irradiación de rutina (para experimentar tasa de dosis similares). Como se mencionó anteriormente (sección 3.2), el soporte debe ser girado continuamente durante la irradiación. Alternativamente, se debe girar 180° alrededor del eje vertical después de transcurrido la mitad del tiempo de irradiación. En este caso, se debe tener cuidado en colocar el soporte de los dosímetros en el mismo lugar después de la rotación.

3.3.2. Temperatura de la irradiación

Debido a que la respuesta de casi todos los dosímetros depende de la temperatura del dosímetro durante la irradiación, mida o estime la temperatura del dosímetro estándar de transferencia durante la irradiación. Generalmente, la temperatura debe variar entre 2-3°C, y preferiblemente debería estar controlada.

3.4. Dosímetro estándar de transferencia

Existen varios laboratorios de dosimetría que producirán y analizarán trazables dosímetros estándares de transferencia disponibles para este propósito. Estos pueden ser laboratorios de dosimetría estándar primaria u otro laboratorio de calibración de dosimetría acreditado. Algunos ejemplos de estos laboratorios son dados en el Apéndice A.

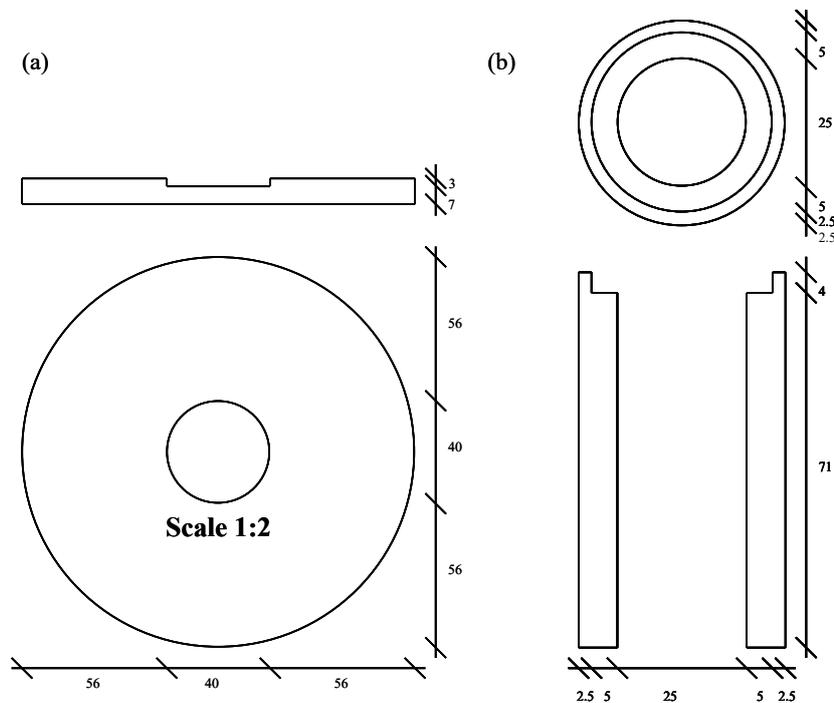


Figura 17. Diseño de un portadosímetro típico (soporte) para colocar los dosímetros y utilizarlos en un Gammacell. El material recomendado es PMMA. Todas las dimensiones están en mm.

Usualmente estos son dosímetros líquidos contenidos en ampolletas de 12-mm-diámetro o pellets de Alanina en algún soporte. Para el procedimiento de este manual, se asume que juegos de tres de esos dosímetros serán irradiados juntos para la medición de la tasa de dosis. Si se usan pellets de Alanina, el laboratorio estándar que suministra dosímetros se le solicitará que suministre un soporte adecuado para los dosímetros que se ajuste a la forma del dispositivo que se use para la calibración. Si los dosímetros de transferencia son de diferentes dimensiones, puede ser necesario rediseñar el soporte para los dosímetros ilustrados en las Fig. 15 y 16.

El tiempo de irradiación de estos dosímetros estándares de transferencia deben ser ajustados para cada instalación dependiendo de la tasa de dosis, la dosis de tránsito y el incremento de temperatura esperado. El objetivo será tener una dosis de tránsito despreciable (menos del 0.5% de la dosis dada al dosímetro de transferencia) sin incrementar mucho la temperatura del dosímetro ($<5^{\circ}\text{C}$) durante la irradiación.



Figura 18. Un portadosímetro cilíndrico (como se muestra en la Fig. 15a) firmemente colocado sobre un soporte de PMMA para irradiación en un Gammacell. Este soporte consiste en una placa de base circular que encaja en la cámara de irradiación del Gammacell. En el centro de esta placa hay un tubo en el que se coloca el soporte del dosímetro. La altura de este tubo debe ser tal que, cuando el dispositivo este colocado en el Gammacell, el centro de los dosímetros coincida con el centro geométrico de la cámara de irradiación. Puede colocarse una marca en la base de la placa de tal manera que siempre sea colocada en la misma orientación en la cámara de irradiación del Gammacell. También puede colocarse una marca en el portadosímetro cilíndrico para reproducir la posición. Un dispositivo similar debe ser utilizado para un irradiador Hussman, de tal manera que los dosímetros (en el portadosímetro cilíndrico) puedan ser colocados consistentemente en la misma posición en el campo de radiación.

Asegúrese que el cronómetro utilizado para medir el tiempo esta calibrado con trazabilidad. (Vea los documentos del fabricante y como checar la veracidad del cronómetro.)

Si es posible, controle la temperatura del dosímetro durante la irradiación a 25°C (o pregunte al laboratorio estándar si tiene alguna preferencia). Alternativamente, mida la temperatura del dosímetro durante la irradiación. Si no se cuenta con un método fácil (por ejemplo termopares) para medir la temperatura durante la irradiación, mida la temperatura del dosímetro justo antes de la irradiación (temperatura mínima) y posteriormente después de la irradiación (temperatura máxima) introduciendo temporalmente un termómetro estándar dentro del soporte del dosímetro cerca del dosímetro. Registre ambos valores de temperatura en la hoja de datos que será enviada al laboratorio estándar junto con los dosímetros irradiados. Si la temperatura del dosímetro fue medida continuamente, anexe la información a la hoja de datos.

El laboratorio estándar analizará los dosímetros de transferencia irradiados y regresará los resultados en un certificado conteniendo el valor de la dosis medida por los dosímetros y también la información respecto a la incertidumbre en este valor. Registre todos los datos en el formato SIT-3.

3.5 Tasa de dosis

Cada laboratorio debe entonces calcular la tasa de dosis desde el valor de la dosis dada en el certificado y el tiempo de irradiación (suponiendo que la dosis de tránsito es despreciable), de la manera siguiente:

Tasa de dosis = Dosis / tiempo de irradiación; la tasa de dosis se puede expresar en kGy/hora, Gy/min o Gy/s.

Registre este valor de la tasa de dosis en la Forma-SIT-3 (Fig. 19). Este valor es válido para las condiciones específicas de irradiación empleados y para el día de la irradiación. Sin embargo, es independiente de la temperatura de irradiación. Asegúrese que el isótopo (^{60}Co o ^{137}Cs) seleccionado en la parte de arriba en la Forma-SIT-3, corresponde a su irradiador.

3.6 Frecuencia de la medición de la tasa de dosis

Para fuentes de ^{137}Cs las cuales comprenden una mezcla variable de dos isótopos con diferentes vidas medias, la tasa de dosis debería ser medida cada tres años o antes si cualquier parte relevante del sistema de

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Form-SIT-3								
2	Dose Rate Measurement with Standards Laboratory Transfer Dosimeters								
3	Note: Also attach here a copy of the Standard Laboratory certificate								
4	Date:	2015-03-03	<input checked="" type="checkbox"/> ^{60}Co	<input checked="" type="checkbox"/> ^{137}Cs					
5	Operator:	AGP	Half-life:	1925.5 days					
6	Dosimeter type:	Alanine							
7									
8									
9	Std Lab Dosimeter number	1296							
10	Reference field								
11	Irradiator	Gammacell 220							
12	Dosimeter holder ID	1							
13	Holder location	Field centre							
14	Irradiation Temperature (°C)								
15	Controlled?	Yes	No	x					
16	Measured	Before=	24	After=	25.4	Other			
17	Irradiation time (secs) ^{1,2}	457							
18	Dose from Std Lab certificate	980.0 Gy							
19	Dose rate ³	2.144 Gy/sec							
20	Dose rate uncertainty [u ₉₅ (%)]	1.6 %							
21									
22	1 How and when was the timer calibrated?	Not calibrated - quartz							
23	2 Is the measurement based on an automatic timer?	Yes							
24	3 If it is done manually, when was the time started and stopped?								
25	4 Dose rate = Dose (from Std Lab certificate, Section 2.4) / Irradiation time								
26	Note: It is assumed that the transit dose is negligible compared to the dose value								
27	When was the last time the dose rate was measured:	2010-09-16							
28	Same irradiation conditions?	yes							
29	What was the value then?	4.006 Gy/sec							
30	Instructions / CalData / SIT-1 / SIT-2 / SIT-3 / SIT-4 / SIT-5 / SIT-6								

Figura 19. Formato - SIT-3 para registro de la información de la tasa de dosis de calibración

irradiación es alterado, tales como reposición de fuentes, o modificación en el mecanismo de movimiento de las fuentes o la programación de irradiación que pudiese afectar la tasa de dosis. Para fuentes de ^{60}Co , las cuales contienen solamente un isótopo y por lo tanto la tasa de decaimiento puede ser calculada con alta precisión, la re-medición de la tasa de dosis solamente será necesario después de la alteración del sistema.

4. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DOSIMETRÍA GAFCHROMIC™

La caracterización de un sistema de dosimetría consta de:

- La calibración del sistema dosimétrico,
- Determinación de la homogeneidad de la respuesta del dosímetro para un lote, y
- Determinación de la incertidumbre total en el valor de dosis medido.

El procedimiento para cada uno de ellos se describe a continuación.

Las características del actual lote de dosímetros están resumidas en el Formato SIT-9 mientras que los datos de calibración son registrados en el Formato - SIT-4 y CalData.

4.1. Calibración

La calibración de un sistema dosimétrico consiste en irradiar diferentes dosímetros a niveles de dosis específicas, midiendo la DO y determinando la respuesta para cada dosímetro y estableciendo una relación entre la respuesta del dosímetro y dosis. Cada uno de estos pasos se discute posteriormente.

4.1.1. Preparación de las películas

- Corte 10 dosímetros de 10 × 10 mm de la hoja de Gafchromic para mediar la DO de fondo.
- Corte tres tiras de 10 × 50 mm para cada dosis de calibración (18 en total).
- Corte tres tiras de 10 × 50 mm para cada una de las dos mediciones de dosis de tránsito (total 6).
- Corte nueve dosímetros de 10 × 10 mm para mediar la homogeneidad de las películas.

Almacene cada juego de películas separadamente en sobres de papel.

4.1.2. DO de fondo (blancos)

Se requiere una medición de valores de la DO de películas no irradiadas de cada lote de dosímetros.

Si el lote tiene más de 6 meses, esta medición debe ser repetida y el valor de la DO (de fondo) debe ser actualizada. Mida un nuevo juego de dosímetros de 10 × 10 mm usando el DR4 en una hoja en blanco, luego copie las tres columnas para las películas de fondo y sobrescriba los valores en C12:E21 de la hoja CalData.

4.1.3. Dosis de Calibración

La irradiación de calibración debe ser realizada a 6 niveles de dosis. Como la respuesta de las películas Gafchromic™ es casi logarítmica, seis dosis de calibración deben ser

	A	B	C	D	E	F	G
1							Form-SIT-4A
2	Gafchromic Dosimetry System Calibration: Irradiation						
3							
4	Date:	2016-06-29					
5							
6	Reference field and dosimeter holder:	Field centre holder 1					
7	(should be the same as those used for the dose rate measurement with transfer dosimeter (Form-SIT-3))						
8							
9	Dose rate of today (from section 3.1):	1.802					
10							
11	Operator:	ANGE					
12	Filter:	590nm/458nm					
13							
14	Dose (Gy)	Calculated Irrad. time (sec)	Actual Irrad. time (sec) ^{1,2}	Nominal Dose	Start Temp	Finish Temp	Temp _{eff} ³
15							
16	50	28	24	43.2	21.3	22.4	22.0
17	70	39	35	63.1	23.0	23.3	23.2
18	90	50	46	82.9	24.0	24.0	24.0
19	110	61	57	102.7	24.0	23.8	23.9
20	130	72	68	122.5	24.0	24.1	24.1
21	150	83	79	142.3	24.0	24.3	24.2
22						T(cal)=	23.6
23	1 When and how was the timer calibrated			Not calibrated			
24							
25	2 Is this measurement based on an automatic timer:			Yes			
26							
27	If it is done manually, when was the timer started and stopped?						

Figura 20. Completar los detalles de calibración en el Formato SIT-4

seleccionadas en una secuencia aproximadamente geométrica. La incertidumbre final de la calibración será afectada por el intervalo de dosis usada para la calibración. Para una menor incertidumbre, debe ser usado un intervalo de aproximadamente $3\times$ entre cada dosis de calibración. Por ejemplo, si la dosis de irradiación de rutina es de 100 Gy, seleccione 6 dosis a partir de 50 hasta 150 Gy en una secuencia geométrica aproximada (50, 60, 80, 100, 120, 150). Utilizando un ajuste logarítmico, este rango puede ser expandido a $5\times$ o $6\times$ y una incertidumbre razonable aún puede ser obtenida. Para esterilidad F1 donde son requeridas altas dosis o para mosquitos donde se requieren dosis más bajas, se deben ajustar los intervalos apropiadamente

Introduzca las dosis de calibración seleccionada en la primera columna de la Forma SIT-4A (Fig. 20, celdas A16:A21). El tiempo de irradiación requerido (en segundos) será mostrado en la columna B tan pronto como el Formato SIT-3 haya sido completado y la fecha de calibración haya sido insertada en la celda G4 de CalData. El tiempo es calculado de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de Irradiación} = \text{Dosis} / \text{Tasa de dosis (actual)}$$

La tasa de dosis usada es suministrada por medio de la hoja de cálculo pero puede ser calculada del valor medido más recientemente (Sección 3.5) y corregido por decaimiento radiactivo desde ese día hasta el día de “hoy” (asegúrese que isotopo correcto ha sido seleccionado en el Formato - SIT-3). Este se calcula como: Tasa de dosis (de hoy) = Tasa de dosis (Sección 3.5) $e^{-\lambda\Delta t}$, donde, Δt = valor de decaimiento (en días), $\lambda(^{60}\text{Co}) = 3.5991 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$ y $\lambda(^{137}\text{Cs}) = 6.3097 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$. Estas constantes de decaimiento están basadas en las vidas medias de 1925.5 días para ^{60}Co , y 30.07 años para el ^{137}Cs .

Introduzca en la celda C16:C21 el tiempo actual utilizado para las exposiciones si por cualquier razón este difiere del valor calculado.

4.1.4. Exposición de la película

Irradie los dosímetros Gafchromic™ en el mismo punto de referencia donde se determinó la tasa de dosis, y con la misma geometría de la irradiación utilizando el mismo soporte de dosímetros. Figures 21 y 22a muestran un diseño estándar de soporte de películas de PMMA que es compatible con las geometrías de los soportes de dosímetros de las figuras Figs. 15a and 15b. Hay tres soportes de película cilíndricos; identifíquelos escribiendo con un marcador A, B o C en la parte inferior (extremo sin ranura) de los soportes. Por cada dosis de calibración marque tres tiras de película de 10 x 50 mm con las dosis e identifíquelos escribiendo A, B o C en un extremo de cada película con un marcador. Iniciando con la dosis más baja, inserte la tira de película (sujetándola con unas pinzas por el extremo



Figura 21. Tres portadosímetros con películas Gafchromic™ son colocados en el soporte cilíndrico para irradiación en un Gammacell. Note que los portadosímetros están colocados de tal manera que las películas queda paralela (tangencialmente) a la superficie curva del soporte cilíndrico. Para soportes planos (cuadrados, los portadosímetros deber ser colocados de tal manera que las películas queden paralelas a la cara mas larga del soporte.

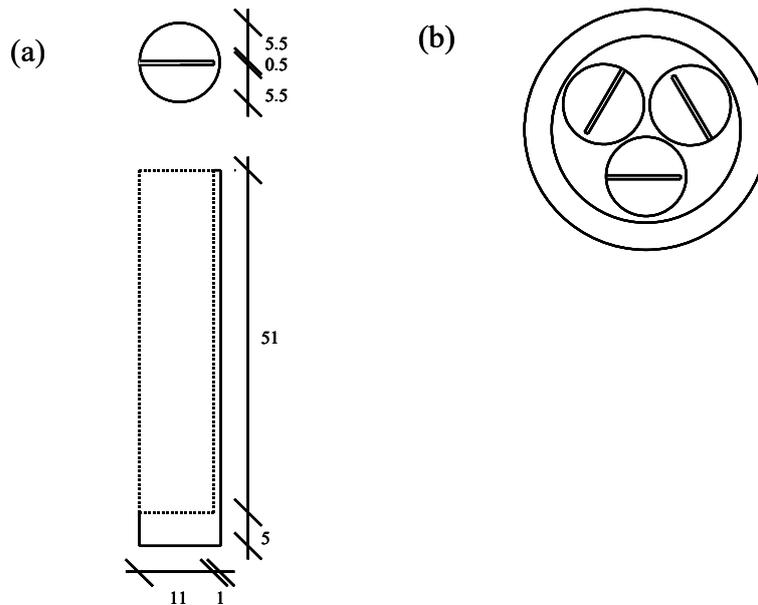


Figura 22. (a) Soporte de las películas Gafchromic™ y (b) arreglo de los tres portadosímetros en el soporte cilíndrico. Note que las tres películas están paralelas (tangencialmente) a la superficie curva del soporte cilíndrico. Todas las dimensiones están en mm.

marcado) en la ranura del soporte cilíndrico. Luego inserte los tres portadosímetros en su contenedor (Figs. 15a o 15b) para irradiaciones simultáneas, similar a los tres dosímetros estándares de referencia. Coloque la porta dosímetros de tal manera que cada película esté paralela a la pared adyacente del portadosímetro como se muestra en la Fig. 22b (vea también Fig. 21). Para evitar que los soportes de la película giren dentro del soporte del dosímetro, puede colocar un pequeño trozo de papel entre ellos. Para un portadosímetro plano, los soportes de película deben colocarse de manera que las películas estén paralelas a la cara más larga del portadosímetro. Coloque el portadosímetro en el soporte en la posición de referencia en el irradiador y exponga durante el tiempo indicado. Almacene cada juego de películas después de la exposición en sobres separados y etiquetados.

4.1.5. Medición de la Temperatura

Mida la temperatura del dosímetro durante la irradiación (Fig. 23). Si esto no es posible, mida la temperatura mínima (justo antes de iniciar el proceso de



Figura 23. Se muestran preparados para irradiación tres dosímetros en un porta dosímetros cilíndrico sobre un soporte para irradiar en un Gammacell. Los termopares son utilizados para medir la temperatura durante la irradiación, donde la unión del termopar se encuentra dentro del soporte del dosímetro junto a los dosímetros. Se utiliza una cinta negra para mantener los cables firmes en su posición. Los cables salen de la cámara de irradiación a través del tubo de acceso central al dispositivo de registro situado en el exterior del Gammacell.

irradiación) y la temperatura máxima de los dosímetros inmediatamente después de la irradiación (ver Sección 3.4 para los detalles de cómo realizarla). Introduzca el valor de la temperatura de cada exposición en las celdas E16:F21. La temperatura efectiva, T_{eff} es calculada de la siguiente manera:

Para mediciones continuas: $T_{\text{eff}} = \text{promedio de todos valores medidos}$,

Para mediciones antes/después: $T_{\text{eff}} = T(\text{antes}) + 2/3 (\Delta T)$,

Donde, $\Delta T = T(\text{después}) - T(\text{antes})$.

Si es posible, controle la temperatura de tal manera que T_{eff} para todas las irradiaciones esté dentro los 2°C. La temperatura de calibración, T_{cal} es el promedio de los seis valores de T_{eff} . La dosimetría de rutina debe ser realizada dentro de ± 5 °C de la T_{cal} (ver 2.3.5.).

4.1.6. Homogeneidad del lote

La homogeneidad de las películas se mide exponiendo simultáneamente a la misma dosis nueve dosímetros de 10 × 10 mm seleccionados al azar en un sobre de papel y posteriormente midiendo su respuesta.

4.1.7. Dosis de tránsito y tiempo de tránsito

La dosis de tránsito es definida como la dosis que una muestra o dosímetro recibe mientras la fuente, el dosímetro o la muestra está en movimiento. La dosis de tránsito se define por:

Tiempo de tránsito = Dosis de tránsito / tasa de dosis,

Donde, el valor de la tasa de dosis se refiere al valor en la posición estacionaria de irradiación.

El tiempo de tránsito no es el tiempo de tránsito físico (o movimiento) del dosímetro (o fuente), es decir el tiempo real que tardan los dosímetros en subir y bajar. Como una aproximación, el tiempo de tránsito es un cuarto del tiempo actual que el dosímetro toma en subir y bajar. Si la dosis de tránsito es significativa comparado a la dosis mínima de interés (es decir, 40 Gy para SIT), es esencial que este valor sea añadido a los valores de dosis nominales (40, 80, etc. Gy, ver Sección 4.1.3) antes que la relación de calibración sea determinada. Asumiremos aquí que si el tiempo de tránsito es menos que 0.05% del tiempo mínimo de irradiación (ej. 40 Gy/tasa de dosis), entonces el tiempo de tránsito (dosis) puede ser ignorado. Para un Gammacell-220 (Nordion), el tiempo de tránsito es aproximadamente 4 s, entonces el tiempo de tránsito (dosis) puede ser ignorado para aquellos irradiadores los cuales tienen una tasa de dosis de menos de 3 Gy/min.

Para medir esto, se irradian dos juegos extra de tres tiras de películas al mismo tiempo total pero con el tiempo dividido en varias partes. Seleccione un tiempo no menor que el tiempo para la dosis mínima de su secuencia de calibración e inserte el valor en la celda A89 "CalData" (Fig. 24); el rango recomendado está indicado a la derecha. Posteriormente seleccione dos números pequeños (digamos 1 y 2) e inserte éstos en el formato CalData en las celdas A87 (N1) y A96 (N2). El primer juego extra de películas se expone primero por el tiempo en A89 y por un segundo el número de veces en A90, el segundo set primero al tiempo en A98 luego por un segundo el número de veces en A99. El tiempo total de exposición es, por lo tanto, el mismo (7+1 y 6+1+1 segundos) pero con la dosis de tránsito adicional (1 y 2 en este ejemplo). Marque los dos juegos de tiras de películas de dosis de tránsito con el tiempo para la exposición inicial (7 y 6 segundos en este ejemplo) y el número

de exposiciones adicionales de 1 segundo (1 y 2) mas A, B, y C para distinguir para distinguir las tres tiras. Exponga las películas según el punto 4.1.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
84		9	0.7493	0.6395	28.5	1.1717	0.7493	0.6395						
85	Transit dose 1	A1	0.5699	0.6039	28.6	0.9437	0.9521	0.9291						
86	N1=	A2	0.5667	0.5952	28.6	0.5699	0.5667	0.5529						
87	1	A3	0.5529	0.5951	28.6	0.6039	0.5952	0.5951						
88		B1	0.5669	0.5977	28.6	0.9485	0.9369	0.9392						
89	7 sec *	B2	0.5613	0.5991	28.6	0.5669	0.5613	0.5515		<= * Select a time in seconds between 15 and 29				
90	plus 1 x 1 sec	B3	0.5515	0.5872	28.6	0.5977	0.5991	0.5872						
91		C1	0.558	0.5909	28.6	0.9443	0.9421	0.936						
92		C2	0.5518	0.5857	28.6	0.558	0.5518	0.5399						
93		C3	0.5399	0.5768	28.6	0.5909	0.5857	0.5768						
94	Transit dose 2	A1	0.6163	0.6014	28.6	1.0248	1.0143	1.0185						
95	N2=	A2	0.6032	0.5947	28.7	0.6163	0.6032	0.6045						
96	2	A3	0.6045	0.5935	28.6	0.6014	0.5947	0.5935						
97		B1	0.6159	0.6013	28.7	1.0243	1.0313	1.0103						
98	6 sec	B2	0.6158	0.5971	28.7	0.6159	0.6158	0.5983						
99	plus 2 x 1 sec	B3	0.5983	0.5922	28.7	0.6013	0.5971	0.5922						
100		C1	0.6169	0.6026	28.7	1.0237	1.025	1.0049						
101		C2	0.6156	0.6006	28.7	0.6169	0.6156	0.5998						
102		C3	0.5998	0.5969	28.7	0.6026	0.6006	0.5969						
103		ND0.5	0.4804	0.5533	28.7	0.4804	0.9792	2.0301						
104		ND1.0	0.9792	1.0821	28.7									
105		ND2.0	2.0301	2.2408	28.7									
106														

Figura 24. Configuración de la dosis de tránsito en el formato CalData.

Si se conoce que la dosis de tránsito es insignificante a la dosis de tratamiento esperada, el cálculo de dosis de tránsito puede ser cancelado mediante la opción ubicada en la parte superior del Formato SIT-4C.

4.1.8. Lectura de las películas

Asegúrese que el DR4 está conectado correctamente, el controlador y el RGwedge instalado (Sección 2.2.). Conecte el DR4 en el puerto USB de la computadora y siga las instrucciones del manual del lector de dosis (DR4) para determinar el puerto COM al cual está conectado. Abra el libro de trabajo de Excel y seleccione la hoja adecuada, CalData, abra el programa RGwedge, seleccione el puerto COM al cual el DR4 está conectado, seleccione **Escribir** en la ventana, haga clic en Conectar e inmediatamente seleccione la celda amarilla resaltada cerca de la parte superior de la hoja de trabajo (identificada como Start here>). Activando “Conect” ocasiona que el DR4 reinicie y envíe la información de encabezado al puerto COM. El programa RGwedge dirigirá los datos a la celda activa en la hoja de trabajo de Excel (Fig. 10).

Ahora, introduzca en las celdas amarillo pálido, los detalles apropiados de fecha, operador y No. de lote de las películas Gafchromic™. Cambie a la hoja SIT-4 y coloque los datos necesarios en las celdas amarillas, 1) dosis de calibración objetivo, 2) tiempo de irradiación actual, 3) temperatura inicial y final (Fig. 20) y números de dosis de tránsito (Fig. 24). Regrese a la hoja CalData y asegúrese que la celda correcta (Fig. 10, celda C9) aun esté seleccionada.

Empiece con las películas de Densidad Neutral (ND), lea todas las películas siguiendo la secuencia en la primera columna. Para las tiras de 10 × 50 mm, corte tres piezas de 10 × 10 mm de cada tira y léalos en secuencia. Cuando una tira haya sido leída remueva la tercera película y cierre la tapa del DR4 para permitir que tome una lectura en blanco. No abra la tapa hasta que el lector lo indique y usted vea la lectura del blanco en la pantalla (Fig. 7). Luego continúe con las próximas películas. Después de las piezas de calibración lea las nueve películas de homogeneidad, luego los dos juegos de dosis de tránsito, y finalmente una vez más los filtros neutrales (ND). Los datos son automáticamente transferidos a la hoja de calibración (SIT-4). Coloque los juegos de dosímetros en sus respectivos sobres de tal manera que puedan ser identificados para volverlos a leer si es necesario.

4.1.9. Selección de la relación de calibración

Una vez que todas las películas han sido leídas la relación de calibración final puede ser seleccionada. Todos los cálculos se muestran en la hoja SIT-4. Examine los datos y en particular los valores de coeficiente de variación CV% (Formato SIT-4B) para ver cualquier error en la entrada de datos, y dosímetros fallados o dañados. El valor de CV % deben ser en su mayoría menos de 1 % y los tres valores de R dentro de una dosis deben estar cercanos.

El cálculo de la dosis de tránsito se muestra en el Formato SIT-4C y la gráfica siguiente. Los dos puntos de dosis de tránsito deberán estar igualmente espaciados encima de la dosis más baja de calibración. El tiempo de tránsito esta mostrado al pie del Formato SIT-4C. Para un GC20 este valor estará cerca de los 4 segundos pero puede diferir significativamente para otros diseños de irradiador.

Las curvas de respuesta y los gráficos de residuos siguen el Formato SIT4D. Se proporcionan en gráficos lineales, cuadráticos y de series de potencia. Idealmente, el valor de los residuos debería ser pequeño y no mostrar una tendencia específica. Los datos residuales se resumen en el Formato-SIT4E a la derecha de los gráficos.

El objetivo es obtener el mejor ajuste (= residual más pequeño) (Fig. 25). Mediante pruebas, examine los valores de U_{fit} (3) para diferentes combinaciones de longitudes de onda (1) y ajustes log/lineal (2). Con las combinaciones que dan el valor más bajo de U_{fit} , seleccione el botón de opción de ajuste (columna) con el más bajo valor de U_{fit} en la caja (4). En la Fig. 25 la relación de longitudes de onda 590 nm/458 nm y log(dose) proporciona un U_{fit} de 0.371 con la relación cuadrática. La opción “Quadratic” esta seleccionado en el botón de ajuste de la caja (4). Valores de U_{fit} menores a 1, indican un buen ajuste. Valores mayores a 2 indican un problema con el ajuste y los datos en Formato SIT-4B deberían ser examinados cuidadosamente para tratar de determinar la fuente del problema.

4.1.10. Cálculo Manual

Para facilitar el proceso manual de los datos y para explicar que es lo que el libro de trabajo calcula, sigue una descripción. Todos estos cálculos los realiza el libro de trabajo.

El objetivo es determinar la relación entre la respuesta del dosímetro y la dosis. Esto puede ser hecho gráficamente o con análisis de regresión.

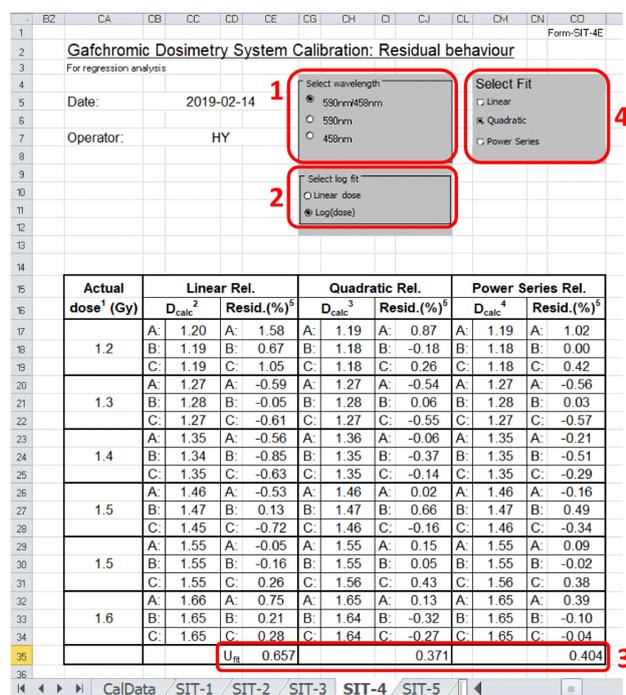


Figura 25. SIT-4E Selección de longitud de onda y ajuste. 1: Longitud de onda 2: Log/lineal 3: Incertidumbre del ajuste 4: Ajuste de la ecuación.

Para el análisis gráfico, grafique ‘Rmedia’ sobre el eje de las “y” contra ‘Dosis actual’ sobre el eje de las “x” como se da en el Formato SIT-4D. Dibuje una curva suave a través de todos los seis puntos. Esta curva puede ser ligeramente no-lineal. Si ésta es significativamente no-lineal, trate de graficar los valores de Rmedia contra log(dosis).

Si se emplea el análisis de regresión, utilice los tres valores de ‘Rcorr’ (como parámetro “y”) por cada valor de “dosis actual” (parámetro “x”). La relación es casi lineal, pero el ajuste cuadrático o de potencia puede ser mejor. La relación de calibración puede ser descrita como:

$$\text{Función lineal: Respuesta} = a + b (\text{Dosis})$$

$$\text{Función cuadrática: Respuesta} = c + d (\text{Dosis}) + e (\text{Dosis})^2$$

$$\text{Función de potencia: } \text{Log}_e (\text{Respuesta}) = f + g \text{Log}_e (\text{Dosis})$$

La selección entre las tres puede ser hecha observando la distribución del porcentaje residual para los tres casos siguiendo el procedimiento de abajo (utilice el Formato SIT-4E):

1. Calcule D_{calc} para cada uno de los tres valores de respuesta (R_{corr}) para las seis irradiaciones (dado en la columna 3 del Formato SIT-4D):

$$\text{Función lineal: } D_{\text{calc}} = (R_{\text{corr}} - a) / b$$

$$\text{Función cuadrática: } D_{\text{calc}} = (1/2e) [-d \pm \{d^2 - 4e(c - R_{\text{corr}})\}^{1/2}]$$

$$\text{Función de potencia: } D_{\text{calc}} = \text{Exp} ((\text{Log}_e (\text{Respuesta}) - f)/g)$$

Inserte estos valores en el Formato SIT-4E, columna 2, 4 o 6.

2. Determine el porcentaje residual para cada punto como:

$$\% \text{ Residual} = 100 \times (D_{\text{calc}} - D_{\text{actual}}) / D_{\text{actual}}$$

Donde, D_{actual} es el valor actual de la dosis administrada (como se da en la columna 1 de la Forma-SIT-4E). Nota: El valor residual (%) puede ser positivo o negativo.

3. Registre los valores ‘Residual (%)’ en el Formato SIT-4E (columna 3, 5 o 7).
4. Grafique ‘Residual (%)’ (sobre eje “y”) contra ‘Actual dose’ (sobre eje “x”) tanto para ajuste lineal, cuadrático y de potencia.
5. Seleccione la relación que genere una distribución aleatoria de los valores residuales en función de la dosis. Si todos generan distribución aleatoria similar, seleccione la función lineal, como la relación de calibración.

Esta relación de calibración es válida para el lote de dosímetro específico para una año, y para la temperatura empleada en la irradiación, $T_{\text{cal}} (\pm 5^\circ\text{C})$. Introduzca la fecha de calibración, la temperatura de irradiación de calibración, T_{cal} y la relación de calibración en la Forma-SIT-9.

Calcule el valor residual de la raíz el cuadrado medio (u_{fit}) para la relación de calibración seleccionada, de la manera siguiente:

$$u_{\text{fit}} = \{\Sigma(\text{Residual}(\%))^2 / n\}^{1/2},$$

Donde, n es el número total de valores residuales (en este caso 18), y la suma que se realizará sobre todos estos valores de n (=18). Registre este valor en el Formato SIT-9. Este valor

representa la incertidumbre que surge del procedimiento de ajuste y se utilizará más adelante en la Sección 4.3.

4.1.11. Frecuencia de calibración

El sistema de dosimetría debe ser calibrado una vez al año o antes si cualquier parte del sistema dosimétrico es modificado, tal como un nuevo lote de dosímetros o reparaciones del lector.

4.2. Incertidumbre

En general, el resultado de cualquier medición es sólo *una aproximación o estimación* del valor medido (por ejemplo, dosis absorbida), y por lo tanto sólo se completa cuando se acompaña de la declaración de la incertidumbre de esa estimación. La incertidumbre (de la medición) se puede definir como un parámetro asociado a la medición, que caracteriza la distribución de los valores que podrían atribuirse razonablemente a la medición. Por lo tanto, la incertidumbre refleja el grado de precisión en el valor medido [16].

La incertidumbre en cualquier medición es un hecho de la vida e inevitable. En primer lugar, las fuentes de incertidumbre deben ser identificadas, y sus efectos minimizados tanto como sea posible. Luego las fuentes restantes de incertidumbre deben ser evaluadas. Esto se hace más fácilmente considerando a su vez, cada paso en la calibración y el uso de un sistema de dosimetría, y evaluando que incertidumbres están probablemente asociadas con cada paso. La incertidumbre asociada con una medición de dosis puede ser calculada mediante la combinación de los componentes individuales juntos. La filosofía usada es atribuir a cada componente de incertidumbre una desviación estándar efectiva, conocida como incertidumbre estándar, y estas incertidumbres estándar se combinan entonces para producir la incertidumbre total. Estos cálculos están presentados en el Formato SIT-9 (Fig. 26). Solo es necesario ingresar manualmente la fecha de recepción del lote de dosímetros.

	A	B	C	D	E	F
1						Form-SIT-9
2	Characteristics of the Current Dosimetry System					
3						
4		Gafchromic dosimeter Lot ID			2101602	
5		Gafchromic dosimeter sheets received on date:			2018-11-15	
6						
7	Calibration of Gafchromic dosimetry system					
8		Date of calibration (valid for only one year)		2019-02-14		
9		Irradiation temperature T(°C)		23.3		
10		Relationship		Quadratic, O.D. = 0.3007 + 2.1218 * dose + - 0.5965 * dose*dose		
11	Background response					
12		Date of measurement (valid for 6 months)		2019-02-14		
13		OD(bkgd)		0.386		
14	Uncertainty Values					
15		Arising from dose rate		$u_{dr}(\%) = 1.6$		date= 2015-03-03
16		Arising from calibration		$u_{fit}(\%) = 0.37$		date= 2019-02-14
17		Arising from lot non-homogeneity (n = 1)		$u_{lot}(\%) = 0.85$		date= 2019-02-14
18		Arising from uncertainty in read-out temperature		$u_{temp-r}(\%) = 0.43$		
19		Arising from uncertainty in the temperature of the dosimeter during irradiation		$u_{temp-i}(\%) = 0.42$		
20						
21				$u_{total}(\%) = 1.95$		

Figura 26. Formato SIT-9 mostrando el resumen de los componentes de incertidumbre.

La incertidumbre total en el valor de la dosis medida usando el sistema de dosimetría Gafchromic consta de varios componentes (todos estos componentes están en%)

- u_{dr} derivado de la incertidumbre en el valor de la tasa de dosis en el punto de referencia (del certificado de un laboratorio estándar, ver Sección 3.4),
- u_{fit} derivado de la incertidumbre en la relación de calibración (ver Sección 4.1.9),

- u_{lot} derivado de la falta homogeneidad de los valores del lote (= CV (%) del Formato SIT-5, ver Sección 4.1.5). Si “n” dosímetros se utilizan en una ubicación para medir la dosis, la incertidumbre en el valor medio esta reducido por \sqrt{n} . Por lo tanto, este componente de incertidumbre para n dosímetros = CV (%) / \sqrt{n} .
- u_{temp-r} : derivado de la incertidumbre en la temperatura del dosímetro durante el procedimiento de lectura de la DO. Asumiendo que la temperatura del dosímetro durante la lectura está dentro $\pm 5^{\circ}\text{C}$ de la temperatura durante la calibración, $u_{temp-r} = 0.7 \times 5 / \sqrt{3}$ donde, 0.7% / $^{\circ}\text{C}$ es el coeficiente de lectura de la temperatura según las estimaciones del Laboratorio del OIEA. El factor de $\sqrt{3}$ se basa en la suposición de que la temperatura del dosímetro tiene distribución de probabilidad rectangular dentro de los dos límites [13].

La incertidumbre total, U_{total} (%) se obtiene sumando el cuadrado de estos componentes:

$$u_{total} = (u_{dr}^2 + u_{fit}^2 + u_{lot}^2 + u_{temp-i}^2 + u_{temp-r}^2)^{1/2}$$

Todos estos valores de U son para 1 desviación estándar (σ). Sin embargo, para implicar un mayor nivel de confianza en que el “verdadero” valor cae dentro del rango reportado, la u_{total} debe multiplicarse por un factor de 2 (llamado “factor de cobertura”). Por lo tanto, se puede afirmar con alrededor del 95% de confianza que el valor “verdadero” de la dosis se encuentra dentro de $D_{medida} \pm 2u_{total}$.

4.3. Uso de la relación de calibración

4.3.1. Punto de medición

Para medir la dosis en un punto, siga el siguiente procedimiento: Use la Forma-SIT-7 cuando utilice un solo dosímetro en cada posición y el Formato SIT-8A cuando use 2-3 dosímetros por posición.

Irradiación:

1. Coloque uno o varios dosímetros de 1cm x 1cm del lote calibrado en cada punto de interés. Use un pequeño sobre para el o los dosímetros y escriba la información relevante de identificación sobre el sobre. Para radiación gamma puede colocarse más de un dosímetro por sobre.
2. Irradie la muestra (con los dosímetros).
3. Estime la temperatura del dosímetro (T_{eff}) durante la irradiación (Sección 4.1.4).
4. Encienda el lector, conectando el DR4 a la PC, el lector tomará como cinco minutos para estabilizarse. (Nota: las mediciones deben realizarse entre las 20 a 28 horas después de la irradiación)
5. Mida la DO siguiendo las instrucciones dadas en la sección 2.2.4. (Operación de rutina para la medición de DO) iniciando el DR4 en la celda P4 del formato-SIT-6 para dosímetros individuales o X5 del Formato SIT-8a para múltiples dosímetros.
6. Mida la DO de los tres filtros Neutrales (ND) antes de iniciar la medición con las películas dosimétricas. Compare estos valores de DO con los medidos durante la calibración del sistema dosimétrico. Diferentes valores indican un problema con el lector (Nota: el último dígito puede diferir, lo cual es aceptable).
7. Extraiga los dosímetros del sobre y mida su DO (Sección 2.2.5).
8. Inserte la fecha de exposición (T4), dosis objetivo (F9), descripción de los dosímetros (columna O, ej. ubicación, propósito de la medición), temperatura de cada dosímetro (columna O) y observaciones adicionales (columna F) cuando use el Formato SIT-7.

9. Inserte la fecha (D4), identificación del lote/proceso (D7), operador (D9), y descripción de los dosímetros (columna W, ej. ubicación, propósito de la medición), cuando utilice el Formato SIT-8a.

4.3.2. Control de proceso

El Formato SIT-8A es usado para control de proceso y se utiliza junto con el Formato SIT-8B. El Formato SIT-8A acepta lecturas de hasta tres dosímetros de una posición, generando una media y estima la incertidumbre para cada posición. Si solo se utilizan dos dosímetros en una ubicación, deje una línea en blanco siguiendo el procedimiento de la sección 4.3.1. Complete la información adicional en el Formato SIT-8B. Para futuros detalles ver la sección 6.

Estos formularios se utilizarían normalmente cuando se suministran insectos a un cliente externo. Imprima estos dos formularios para incluirlos con el envío

5. MEDICIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE DOSIS (MAPEO DE DOSIS)

5.1. Objetivo

El propósito principal de la realización del mapeo de dosis es para verificar que la variabilidad de la dosis en la muestra irradiada es aceptable para la aplicación en mención. Esto debe hacerse antes que la irradiación útil se lleve a cabo. Si la distribución es más amplia que la aceptable, indica la necesidad de modificar el procedimiento de irradiación o el tamaño o forma del contenedor. Esta actividad se denomina generalmente como “Proceso de Calificación” ya que establece valores de todos los parámetros del proceso necesarios para conseguir la dosis específica en la muestra [5]. Ver la Sección 6.3 y el Formato SIT-8B para ejemplos de los parámetros del proceso.

5.2. Procedimiento

Corte dosímetros de 10×10 mm de una hoja de películas Gafchromic™. Coloque al menos tres dosímetros juntos en un sobre. Llene el contenedor que será mapeado con el producto normalmente irradiado, o un material similar disponible y arregle los sobres de dosímetros a través de la carga, estando seguro de colocar sobres en los lugares donde se espera se tendrán dosis máximas y mínimas. Lea los dosímetros después de 24 horas en el DR4 utilizando la calibración realizada con las instrucciones dadas anteriormente y registre el datos del promedio y la desviación estándar de las dosis medidas de acuerdo a la ubicación registrada en el sobre. Utilice el Formato SIT-7 para el registro de los datos.

En cargas de hasta 20×25 cm, puede también ser realizado irradiando hojas completas de películas para posteriormente ser escaneadas, siguiendo las instrucciones dadas en *Dose Mapping by Scanning Gafchromic Film to Measure the Absorbed Dose of Insects during Their Sterilization* [11].

5.3. Aplicación para investigación

Si se irradian pupas para fines de investigación, como por ejemplo para establecer la relación entre la dosis y su efecto, es intrínsecamente esencial que la dosis sea lo más uniforme posible a través de la muestra irradiada. Para medir la distribución de la dosis en la muestra, coloque varios dosímetros (o una tira de película) en el recipiente de la muestra. Los dosímetros deben ser protegidos en sobres de papel para evitar el contacto con pupas.

5.4. Aplicación comercial

Para aplicaciones comerciales, generalmente se irradian volúmenes más grandes, y por lo tanto la dosis no es tan uniforme como para volúmenes pequeños utilizados para aplicaciones de investigación. La variación de dosis es inevitable, y el objetivo principal del mapeo de dosis es determinar la dosis máxima y mínima en el contenedor y las regiones donde éstas se producen. Lleve a cabo la determinación detallada de la dosis colocando cuidadosamente varios dosímetros en todo el volumen irradiado. Coloque los dosímetros en un patrón de cuadrícula regular específico, pero, coloque más dosímetros en las regiones donde se esperan las dosis extremas de acuerdo a los resultados anteriores o de análisis teórico. Alternativamente, tiras largas o hojas de películas Gafchromic pueden ser utilizadas [11]. Si alguna porción de las pupas está recibiendo dosis demasiado alta o demasiado baja para la aplicación en mención, se necesitan llevar a cabo algunos cambios antes que se haga la irradiación a gran escala.

5.5. Ubicación de monitoreo de dosis

Para el control del proceso durante la irradiación de rutina, en ocasiones es necesario colocar dosímetros en o sobre el contenedor de pupas (ver Sección 6.2). Se colocan preferentemente en un punto donde se espera que la dosis sea mínima. Sin embargo, no siempre es posible hacerlo. Alternativamente, se puede colocar un dosímetro (s) en un lugar de monitoreo que sea conveniente en el contenedor del producto. Durante el ejercicio de mapeo de dosis, seleccione un lugar de monitoreo y establezca la relación entre la dosis en este punto y la dosis mínima en el producto. Esta relación depende fuertemente de la configuración de la carga y debe ser determinada para cada configuración utilizada. Para reducir la incertidumbre en el proceso, el gradiente de dosis en esta ubicación no debería ser significativo.

6. CONTROL DE PROCESO

6.1. General

Realice la irradiación de rutina según la información recopilada durante el ejercicio de mapeo de dosis; es decir, asegúrese de que los valores de todos los parámetros del proceso sean los mismos que los establecidos durante la calificación del desempeño (Sección 5.). Por tanto, se espera que la distribución de dosis sea aceptable. Por otro lado, es necesario contar con algunas medidas de control del proceso para demostrar con un alto grado de confianza que todo el proceso se llevó a cabo según lo especificado. Esto se logra a través de dos procedimientos independientes: a) dosimetría de rutina y b) monitoreo de los parámetros del proceso. Además, el uso de indicadores sensibles a la radiación ayuda a simplificar el proceso de inventario y da confianza en que cada contenedor fue irradiado. Estas medidas de control del proceso deben estar respaldadas por ensayos periódicos del nivel de esterilidad alcanzado cuando sea apropiado.

6.2. Dosimetría de Rutina

Para cada lote de irradiación, coloque al menos tres dosímetros (en un sobre) en el lugar donde se espera que la dosis sea mínima o en el lugar de monitoreo identificado durante la calificación de desempeño (Sección 5.4). Por lo tanto, si el valor de la dosis (media de los tres valores) medido por estos dosímetros es aceptable (como se estableció durante el proceso de calificación), entonces se puede concluir que el lote de irradiación en particular ha recibido la dosis esperada. Utilice el Formato SIT-8A para registrar los datos. Cada instalación debería determinar por sí misma qué constituye un lote de irradiación y cuántas mediciones de este tipo deberían realizarse por lote.

6.3. Monitoreo de los parámetros del proceso

Controlar, monitorear y documentar los valores de todos los parámetros del proceso que puedan afectar la dosis. Tales parámetros incluyen: tamaño del contenedor, cualquier arreglo específico de la pupa dentro del contenedor, posición del contenedor, tiempo de irradiación, y la velocidad y rotación del contenedor (si esto aplica).

Use el Formato SIT-8B para el registro de los datos.

6.4. Indicadores de Irradiación

Adecuados indicadores sensibles a la radiación deben ser colocados en cada contenedor de empaque antes del proceso. Verifique el estado del indicador antes e inmediatamente y después de la irradiación. El uso de estos indicadores es utilizado para mantener separados los contenedores de empaque irradiados de los no irradiados. Sin embargo, también en el sitio debe haber un procedimiento administrativo para identificar los contenedores irradiados.

Estos indicadores no reemplazan los dosímetros de rutina. Los dosímetros de rutina son absolutamente esenciales tal y como se discute en la Sección 6.2.

7. DOCUMENTACIÓN

Documente toda la información recabada durante los procedimientos descritos anteriormente y archive juntos estos documentos en un lugar de fácil acceso. Esto es necesario para investigación como también para aplicaciones comerciales. Prepare y utilice los formatos adecuados para hacer sus registros consistentes, tales como los formatos impresos suministrados por el libro de trabajo de Excel. Los operadores deberán firmar y fechar los formatos y archivarlos como una parte integral del aseguramiento de calidad para propósitos de auditoría.

REFERENCIAS

- [1] DYCK, V.A., HENDRICHS, J., ROBINSON, A.S. (Eds), *Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-Wide Integrated Pest Management*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL (2021) xvii+1200 pp. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781000377767>.
- [2] BAKRI, A., MEHTA, K., LANCE, D., “Sterilizing insects with ionizing radiation”, *Sterile Insect Technique. Principles and Practice in Area-Wide Integrated Pest Management*, 2nd ed. (DYCK, V.A., HENDRICHS, J.P., ROBINSON, A.S., Eds), CRC Press, Boca Raton (2021) 355–398 <https://www.taylorfrancis.com/chapters/sterilizing-insects-ionizing-radiation-bakri-mehta-lance/e/10.1201/9781003035572-11>.
- [3] VALENTIN, J., INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (Eds), *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP publication 103, Elsevier, Oxford (2007) 332 pp. https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_37_2-4.
- [4] FAO/IAEA/USDA, *Product Quality Control for Sterile Mass-Reared and Released Tephritid Fruit Flies Version 7.0*, International Atomic Energy Agency, Vienna (2019) 1–148 pp. <https://www.iaea.org/sites/default/files/qcv7.pdf>.
- [5] ISO/ASTM, “51940:2013(E) Guide for dosimetry for sterile insect release programs”, *Annual Book of ASTM Standards*, 12.02, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013) 1–12.
- [6] PARKER, A.G., VREYSEN, M.J.B., BOUYER, J., CALKINS, C.O., “Sterile insect quality control/assurance”, *Sterile Insect Technique. Principles and Practice in Area-Wide Integrated Pest Management*, 3.5, 2nd ed. (DYCK, V.A., HENDRICHS, J.P., ROBINSON, A.S., Eds), CRC Press, Boca Raton, FL (2021) 399–440 <https://www.taylorfrancis.com/chapters/sterile-insect-quality-control-assurance-parker-vreysen-bouyer-calkins/e/10.1201/9781003035572-12>.
- [7] ISO, “14470 Food irradiation -- Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food”, International Organization for Standardization, Geneva (2011).
- [8] ISO/ASTM, “51261:2002(E) Standard guide for selection and calibration of dosimetry systems for radiation processing”, *Annual Book of ASTM Standards*, 12.02, ASTM International, West Conshohocken, PA (2011) 970–988.
- [9] IAEA, *Dosimetry for Food Irradiation*, Technical Reports Series 409 409, International Atomic Energy Agency, Vienna (2002) 1–161 pp.
- [10] MEHTA, K., PARKER, A., TESSIER, F., *Gafchromic® film dosimetry for low energy X radiation*, *Radiat. Meas.* **67** (2014) 48.
- [11] FAO/IAEA, *Dosimetría Para La TIE: Procedimiento Operativo Estándar Para El Sistema de Dosimetría de Películas Gafchromic™ Para Radiación X de Baja Energía*, IAEA, Vienna, Austria (2022) <https://www.iaea.org/sites/default/files/22/02/x-ray-sop-es-excel-embedded.pdf>.
- [12] FAO/IAEA, *Dose Mapping by Scanning Gafchromic Film to Measure the Absorbed Dose of Insects during Their Sterilization*, International Atomic Energy Agency, Vienna (2020) iv+12 pp. <https://www.iaea.org/sites/default/files/dose-mapping-gafchromic-2020-11-02.pdf>.
- [13] FAO/IAEA, *Dosimetría Para La TIE: Procedimiento Operativo Estándar Para El Sistema de Dosimetría de Películas Gafchromic™ Para Radiación Gamma*, IAEA, Vienna, Austria (2022) <https://www.iaea.org/sites/default/files/22/02/gamma-sop-es-excel-embedded.pdf>.
- [14] ASHLAND, *Gafchromic™ HD-V2 Film Specification and User Guide*,

- <http://www.gafchromic.com/documents/gafchromic-hdv2.pdf>.
- [15] YAMADA, H., PARKER, A., Gafchromic™ MD-V3 and HD-V2 film response depends little on temperature at time of exposure, *Radiat. Phys. Chem.* **196** (2022) 110101 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969806X22001438>.
- [16] LI, Z. et al., A study of dosimetry characteristics of GAF DM-1260 radiochromic films, *Radiat. Phys. Chem.* **57** (2000) 103 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X9900345X>.
- [17] JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, *JCGM* **100** 2008 (2008) 1.

BIBLIOGRAFÍA

Standards²

ISO/ASTM 51275 Practice for Use of a Radiochromic Film Dosimetry System

ISO/ASTM 51539 Guide for Use of Radiation-Sensitive Indicators

ISO/ASTM 51900 Guide for Dosimetry in Radiation Research on Food and Agricultural Products

ISO/ASTM 51940 Guide for Dosimetry for Sterile Insect Release Programs

ISO/ASTM 52116 Practice for Dosimetry for a Self-Contained Dry-Storage Gamma-Ray Irradiator

ASTM E-1026 Practice for Using the Fricke Reference Standard Dosimetry System

² Para las Normas ASTM y ISO/ASTM mencionadas aquí, visite la página web de ASTM (www.astm.org), o contacte el servicio a clientes de ASTM (service@astm.org) éstas Normas son generalmente casi cada cinco años; favor consulte la última versión.

APÉNDICE A – PROVEEDORES DE DOSÍMETROS ESTÁNDARES DE TRANSFERENCIA

Ejemplos de laboratorios estándares donde pueden ser obtenidos trazables dosímetros estándares de transferencia. Esta no es una lista exhaustiva y no constituye una recomendación por el OIEA.

Laboratorios de Dosimetría Estandar Primaria

Centre for Ionizing Radiation Metrology
National Physical Laboratory
Teddington, Middlesex
United Kingdom, TW11 0LW
Tel: +44 208 943-6647
Fax: +44 208 943-6680
E-mail: peter.sharpe@npl.co.uk or david.crossley@npl.co.uk
<http://www.npl.co.uk/ionrad/services/mail.html>

Ionizing Radiation Division
National Institute of Standards and Technology
Gaithersburg MD
U.S.A. 20899-8460
Stephen M. Seltzer
Tel: 301/975-555, E-mail: stephen.seltzer@nist.gov
Marc F. Desrosier
Tel: 301/975-5639, E-mail: marc.desrosiers@nist.gov
James M. Puhl
Tel: 301/975-5581, E-mail: james.puhl@nist.gov

Laboratorios Acreditados de Calibración de Dosimetría

Risø High Dose Reference Laboratory
Risø National Laboratory
Building NUK-201
Frederiksborgvej 399,
P.O. 49, DK-4000 Roskilde, Denmark
Tel: +45 46 774677,
Fax: +45 46 775688,
risoe@risoe.dk

MDS Nordion
Ion Technologies Customer Service Department
447 March Road
Ottawa, Ontario, K2K 1X8
Canada
Tel: +1 613 592 2790
Tel: +1 800 465 3666 (North America Only)
Fax: +1 613 592 6937
E-mail: ion.sales@mds.nordion.com

Aérial
Centre de Ressources Technologiques,
Rue Laurent FRIES – Parc d’innovation,
BP 40443 – 67412 Illkirch Cedex,
France,
Tel: +33 3 88 19 15 15 - Florent Kuntz
Fax: +33 3 88 19 15 20
www.aerial-crt.com

APÉNDICE B – DOSIS PARA PUPAS

El siguiente procedimiento describe como dar la misma dosis para pupa en un campo de rayos X y en un campo de rayos gamma de Co-60.

1). La dosis medida por el sistema dosimétrico calibrado (ya sea en un campo de Co-60 o en un campo de rayos X) es "dosis al agua" (es decir, energía absorbida en unidad de masa de agua) y NO "dosis a las pupas".

2). Dado que el efecto de la radiación sobre las pupas depende de la energía absorbida por ellas (no la del agua) y esta depende del fotón de energía, por comparación entre el efecto de la radiación gamma y la radiación X es necesario calcular la "dosis a pupas".

3). La dosis para pupas, D_p , puede ser calculada de la dosis medida, D_w , como sigue:

$$D_p = D_w [(S/\rho)_p / (S/\rho)_w] \equiv D_w [S_{ratio}]$$

Donde,

D = dosis,

Los subíndices 'p' y 'w' refieren a pupas y agua, respectivamente, y

S/ρ = Poder de frenado de colisión masiva para electrones ($\text{MeV cm}^2/\text{g}$), el cual está en función de la energía.

4). Por lo tanto, dosis para pupas, D_p es:

En un campo de Co-60: $D_p^{60} = D_w^{60} [S_{ratio}]^{60}$

En un campo de Rayos-X: $D_p^x = D_w^x [S_{ratio}]^x$

Si queremos dar la misma dosis para pupas en ambos campos de radiación, que es $D_p^{60} = D_p^x$

$$D_w^{60} [S_{ratio}]^{60} = D_w^x [S_{ratio}]^x$$

$$D_w^x = D_w^{60} \{ [S_{ratio}]^{60} / [S_{ratio}]^x \}$$

Esto significa que para dar la misma para pupas en los dos campos, los dos valores de dosis medidas (dosis para agua) deben estar relacionados como arriba se muestra.

Vea la tabla siguiente para los valores de S_{ratio} en función a la energía de los electrones.

Debemos tomar el valor de S_{ratio} para la energía de los electrones secundarios. Para los rayos X de 150 keV, la energía del electrón podría ser 30-100 keV, y para los rayos gamma de Co-60, la energía podría estar cerca de 300-500 keV. Sin embargo, se puede observar en la tabla que la S_{ratio} es bastante constante en el rango relevante de la energía del electrón, esto es 1.0 ($\pm 0.4\%$). Por lo tanto, el segundo término en la ecuación anterior es 1.0.

Por lo tanto, $D_w^x = D_w^{60}$. Es decir, cuando los dosímetros miden la misma dosis en los dos campos, estamos dando la misma dosis a las pupas. Además, dado que S_{ratio} es la unidad, la "dosis al agua" y la "dosis a las pupas" son las mismas para ambos campos de radiación.

Como la LET es diferente para rayos-X y rayos gamma de Co-60, su RBE (Efectividad Biológica Relativa, por sus siglas en Ingles) e podría también ser diferente, aunque se espera que haya una muy pequeña diferencia. Por lo tanto, la misma dosis absorbida (física) podría tener diferentes efectos biológicos (esterilización y efectos sobre la calidad) en los dos campos. Esto únicamente puede ser determinado por experimentos biológicos/entomológicos.

PODER DE FRENADO DE COLISION MASIVA DE LOS ELECTRONES PARA
AGUA Y PUPAS (*datos de ICRU Reporte 37, 1984*)

Energía (MeV)	Pupas (MeV cm ² /g)	Agua (MeV cm ² /g)	Pupas/agua
0.03	9.688	9.653	1.004
0.035	8.619	8.592	1.003
0.04	7.799	7.777	1.003
0.045	7.149	7.130	1.003
0.05	6.618	6.603	1.002
0.055	6.179	6.166	1.002
0.06	5.807	5.797	1.002
0.07	5.215	5.207	1.001
0.08	4.763	4.757	1.001
0.09	4.406	4.402	1.001
0.1	4.117	4.115	1.001
0.125	3.591	3.591	1.000
0.15	3.236	3.238	0.999
0.175	2.980	2.984	0.999
0.2	2.789	2.793	0.999
0.25	2.522	2.528	0.998
0.3	2.348	2.355	0.997
0.35	2.226	2.233	0.997
0.4	2.138	2.145	0.997
0.45	2.073	2.079	0.997
0.5	2.022	2.028	0.997
0.55	1.983	1.988	0.998
0.6	1.953	1.956	0.998
0.7	1.909	1.910	1.000
0.8	1.881	1.879	1.001
0.9	1.864	1.858	1.003
1.0	1.853	1.844	1.005