

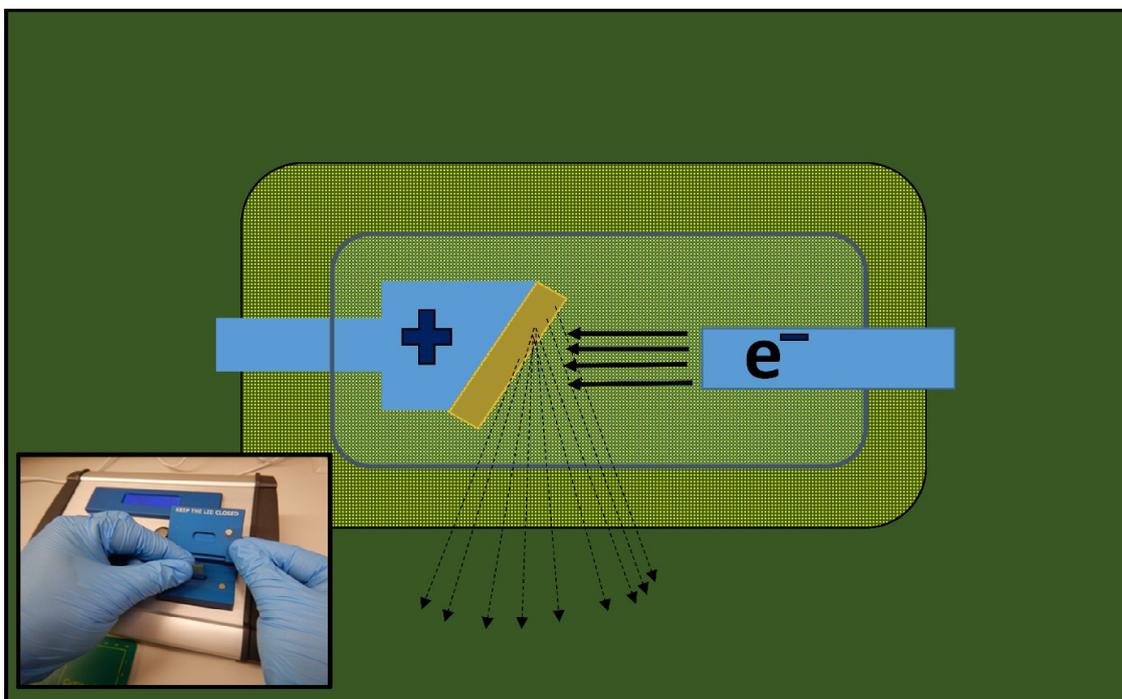


IAEA

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 X DE BAJA ENERGÍA

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 adecuada de citar este documento es:

FAO/IAEA. 2022. Dosimetría para la TIE: Procedimiento Operativo Estándar para el sistema de dosimetría de película Gafchromic™ para Radiación X de Baja Energía v. 1.0, Andrew Parker, Kishor Mehta and Yeudiel Gómez-Simuta (eds.), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación /Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, Austria. 51 pp.
<https://www.iaea.org/sites/default/files/22/02/x-ray-sop-es-excel-embedded.pdf>

Dosimetría para la TIE:
*Procedimiento Operativo Estándar para el sistema de dosimetría de película
Gafchromic™ para Radiación X de Baja Energía*

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).	10
3. Confiabilidad a través de la trazabilidad	14
3.1. General	14
3.2. Campo de radiación de referencia	15
3.3. Condiciones de irradiación de referencia	17
3.4. Dosímetro estandar de transferencia	19
3.5. Frecuencia de la medición de la tasa de dosis	21
4. Caracterización del sistema dosimétrico Gafchromic™	22
4.1. Calibración	22
4.2. Homogeneidad del lote de dosímetros	25
4.3. Incertidumbre	26
4.4. Características del sistema de dosimetría actual	27
4.5. Uso de la relación de calibración	27
5. Medición de la distribución de dosis (Mapeo de dosis)	28
5.1. Objetivo	28
5.2. Aplicación para investigación	28
5.3. Aplicación comercial.....	28
5.4. Ubicación de monitoreo de dosis	28
5.5. Mapeo de dosis mediante escaneo de películas	29
6. Control de proceso	30
6.1. General	30
6.2. Dosimetría de rutina	30
6.3. Monitoreo de los parámetros de proceso.....	30
6.4. Indicadores sensibles a la radiación	30
7. Documentación.....	31
Referencias	32
Bibliografía.....	33
Normas	33
Otras publicaciones.....	33
Apéndice A.....	34
Radiación X vs Radiación gamma.....	34
Apéndice B.....	37
Dosis para pupas.....	37

Apéndice C.....	39
Propiedades del ‘arroz instantaneo’	39
Apéndice D.....	40
La cámara de ionización en el Laboratorio de Control de Plagas de Insectos	40
Apéndice E	42
Parámetros que afectan la respuesta del dosímetro de película Gafchromic para radiación X de baja energía	42

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 e 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 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 es consistente con el proceso [8, 9]. Considerando estos factores, el sistema de dosimetría Gafchromic™ ofrece para los usuarios de la TIE y sus clientes un medio relativamente simple, de bajo costo y seguro 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 DoseReader, pero cualquier lector fotométrico capaz de medir a 460 y 600 nm puede ser utilizado con apropiadas modificaciones al procedimiento. Como casi todos los sistemas de dosimetría, el desempeño del sistema Gafchromic™ es afectado por factores ambientales, tales como temperatura y tiempo de análisis. La calidad de la dosimetría por lo tanto, el éxito del proceso de esterilización entonces depende de seguir rigurosamente los procedimientos descritos.

Este manual reúne en un documento una descripción de los componentes del sistema de dosimetría Gafchromic™, el procedimiento para su caracterización y su aplicación para la validación y el control de procesos [6], junto con las referencias a la normas 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 X de baja energía (150-225 keV) [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]. Hay un documento complementario específicamente para la radiación gamma [11]. También está disponible un manual complementario sobre el uso de la película Gafchromic™ 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].

Este Procedimiento Operativo Estándar fue adaptado para radiación X de baja energía del Manual original *Dosimetry System for SIT: Manual for Gafchromic™ film* desarrollado por Dr. Kishor Mehta bajo el contrato IAEA/2000CL9124 en 2004. La adaptación fue realizada por Sr. Yeudiel Gómez-Simuta bajo el contrato TAL-NAFA20150922-001 y Sr. Andrew G. Parker bajo el contrato TAL-NAFA20210531-003. El documento fue traducido por el Sr. Yeudiel Gómez-Simuta. 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 04™. Incluye información sobre el manejo de la película, su comportamiento de absorción óptica y magnitudes de influencia (parámetros ambientales) que afectan el rendimiento 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 (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 la TIE), describe el uso de este sistema de dosimetría calibrada para irradiadores de rayos-X 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 para el control de procesos.

También hay una hoja de cálculo adjunta en Microsoft Excel disponible en la página web del OIEA, que contiene todos los formatos con fórmulas para hacer los cálculos necesarios de manera automática (el archivo no contiene macros). Las instrucciones se incluyen 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 (DoseReader 04), las películas dosimétricas, Gafchromic™, la hoja de cálculo de Excel y los accesorios.

2.2. DoseReader 4¹

El Lector de Dosis 04 (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 dosímetros de película radiocrómica de 10 x 10 mm en hasta cuatro longitudes de onda fijas. Los resultados, junto con la temperatura del lector son automáticamente transferidos a la computadora usando una conexión USB (la 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 al inicio y pueden ser programadas otras combinaciones por el fabricante a solicitud del usuario.

2.2.1. Componentes del Sistema

El sistema Lector de Dosis 04 consiste en los siguientes componentes:

- Unidad Lectora de Dosis (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.

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

2.2.3. Plataforma requerida

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

El DR4 enciende automáticamente tan pronto se conecta a la PC (o cualquier suministro externo de energía). El DR4 no tiene interruptor de encendido por separado. Cuando se necesita reiniciar el equipo, esto se puede hacer desconectando y reconectando 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 siguiente mensaje (Fig. 1):



Figura 1. Vista esquemática del DR4 en el arranque.

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

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



Figura 2. Selección de la longitud de onda.

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 MD-HD), otras indican la longitud de onda de lectura ("B" para azul (458 nm), "G" para verde (522 nm), "A" para ambar (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 (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 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). Cuando este mensaje aparezca en la pantalla, asegúrese de que no hay ninguna película en la ranura, cierra la tapa presione cualquiera de los dos botones



Figura 3. Preparación para la medición del blanco.

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 una película esta insertada, presione el botón "H" (derecho), remueva la película y cierre la tapa, luego presione el botón "Y" (izquierda). La pantalla quedará en blanco hasta que finalice 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. Mensaje de lectura en blanco forzada

Si el botón identificado como FILM (botón derecho) es presionado cuando no hay ningún en blanco disponible la pantalla “Measure blank!” aparece. Esto pasa cuando el DR4 forzó 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 es 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. Las medidas 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

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



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

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 las instrucciones, consulte la sección 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 DR4 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.

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 (DO), 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 funcionamiento correcto continuo 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 lector de dosis de películas radiocrómicas. 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), una para resumir las características del sistema de dosimetría (TIE-9) y una para corregir lecturas diferentes a 24 horas (Tiempo). Existe también una hoja que contiene instrucciones simplificadas. La hoja de Excel calcula la relación entre la respuesta y dosis aplicada para regresiones lineales, cuadráticas y de potencia, contra ya sea la dosis o el 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 IPCS: 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). Las celdas de color amarillo pálido requieren la entrada manual de datos adicionales.

	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	S
13	(Background)	2				0	0	

Figura 10. Formato de entrada de datos con los encabezados y lectura del primer filtro ND. El DR4 debe iniciarse como en la figura y el cursor colocado en la celda amarillo brillante (C4).

2.2.8. Aviso de Excel:

La entrada de datos en una hoja de Excel puede ser controlada de varias maneras. El movimiento predeterminado del cursor es hacia abajo, pero este puede ser cambiado 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 irá hacia arriba a la izquierda de la celda y luego bajará 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 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 película Gafchromic™ HD-V2¹

Material	Grosor (microns)	Densidad (g/cm ³)	Composición (atom%)			
			C	H	O	N
Base de polyester 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 20µm entre las 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 para dosis arriba de 50Gy. Ambas películas MD-V3 o HD-V2 pueden ser utilizadas con este SOP.

2.3.2. Espectro de absorción

El espectro de absorción para el material del dosímetro Gafchromic™ para la región de longitud de onda de relevancia (400 – 700 nm) se muestran en la Fig. 11 para dosímetros no irradiados también para dosímetros irradiados a varias dosis [16]. La longitud de onda a ser usada para 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. Midiendo simultáneamente al mismo tiempo 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.

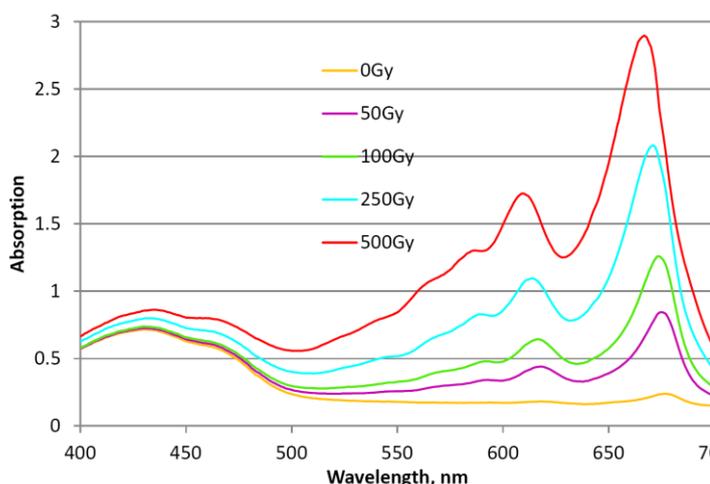


Figura 11. Espectro de absorción de la película Gafchromic™ HD-V2 a varias dosis.

2.3.3. Respuesta

La respuesta, en este SOP, significa la diferencia en la DO entre una película expuesta y una NO irradiada, corregida por la temperatura.

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 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 un ajuste cuadrático da una aproximación más cercana de 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 van a ser irradiadas en ambientes de oxígeno reducido (nitrógeno, hipoxia o anoxia), la calibración debe ser realizada en nitrógeno, hipoxia o anoxia, o los dosímetros pueden ser colocados en una ubicación de referencia fuera del contenedor al aire libre.

2.3.4. Luz ultravioleta

No hay medidas exigentes a 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 del dosímetro de película irradiado (para una misma dosis) tiene poca variación cuando la temperatura al momento de la irradiación está dentro del rango de 5 a 40 °C [17]. Arriba de ese rango la variación máxima es acerca de $\pm 2\%$, que normalmente es menor que la incertidumbre del sistema de dosimetría, 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, no se requiere corrección, pero para diferencias superiores a $\pm 5^\circ\text{C}$ se debe construir una calibración separada a la temperatura relevante.

La dependencia de la DO sobre la temperatura del dosímetro durante su lectura fue determinada por Li *et al.* [18] para una versión inicial de la película. Sin embargo, estos efectos a menudo varían de un lote a otro. Algunos experimentos cortos realizados en el Laboratorio del OIEA indican que el coeficiente de temperatura de lectura fue de aproximadamente $0.7\%/^\circ\text{C}$ para un lote de dosímetros evaluados en un rango de temperatura

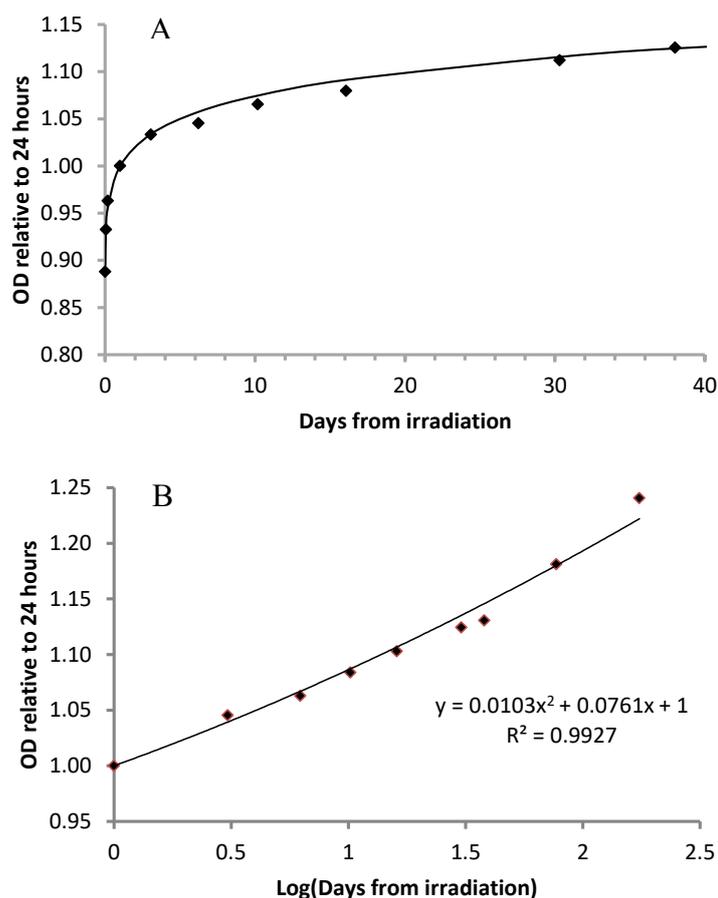


Figura 12. Cambio de DO de la película Gafchromic™ HD-V2 con el tiempo. A: tiempo lineal hasta 38 días; B: Log de tiempo hasta 174 días

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 puntos finos) 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, suciedad o 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 del lector 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 de papel rotatorio 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 Gafchromic™ MD-V3).

Es conveniente medir el tamaño correcto colocando la hoja de la película sobre un papel cuadriculado 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.



Figura 13. Una navaja afilada, una regla de plástico y una cuadrícula debajo de la película ayudan a cortarla convenientemente al tamaño deseado.

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 proporcionar el suficiente material de incremento (build-up material) y 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 dañar la película.

2.3.7. DO de fondo (blancos)

Mida los valores de DO de películas no irradiadas para cada lote de dosímetros. Corte 10 dosímetros de la hoja de película. Mida la DO de cada dosímetro siguiendo el procedimiento de la sección 2.2.5.

Si el lote tarda más de 6 meses, esta medición deberá ser repetida y los valores de DO (fondo) actualizados.

3. CONFIABILIDAD A TRAVÉS DE LA TRAZABILIDAD

3.1. General

La confiabilidad de la medición de la dosis utilizando el sistema de dosimetría Gafchromic™ principalmente depende 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 se conoce 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 el cual es comparable con estos estándares. Esta sección describe el procedimiento para estas mediciones.

La forma más común de medir la tasa de dosis en Rayos X es con una cámara de ionización. Existen cámaras selladas o expuestas al aire. Las cámaras de aire libre frecuentemente incorporan la medición de la temperatura en el vástago y la medición de la presión en el digitalizador para proporcionar una corrección automática de la temperatura y la presión. Es importante asegurarse que el pequeño agujero que permite la circulación del aire en la cámara, no sea obstruido por los cambios de temperatura y que hay paso libre de aire entre la cámara y el ambiente. Las cámaras selladas disponibles no requieren correcciones de temperatura y presión; la seguridad de la cámara cae sobre la integridad de su sello y esto no es fácil de verificar pero puede permitir el uso de la cámara en agua sin ninguna protección adicional.

La dosis, y por lo tanto la tasa de dosis, puede ser medida con dosímetros químicos, tales como Fricke o Alanina. Los dosímetros de Alanina son proporcionados como parte del servicio de calibración por varios laboratorios de dosimetría estándar y estos pueden ser contactados para buscar calibraciones en el rango apropiado de energía. Los dosímetros químicos están fuera del alcance de este manual y se asume que las cámaras de ionización selladas o de aire libre con correcciones automáticas y electrodos son utilizadas.

Si hay más de un irradiador de energía similar disponible, seleccione el que proporcione el lugar más conveniente para irradiar los dosímetros y donde la temperatura pueda ser controlada o medida más fácilmente. El sistema de dosimetría Gafchromic™ es entonces calibrado irradiando los dosímetros a varios niveles de dosis en el punto de referencia. Una vez que el sistema dosimétrico es calibrado, este estará listo para ser utilizado donde quiera y con casi cualquier tipo de irradiador con fotones de energía equivalentes.

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

Nota: Una calibración Gafchromic™ realizada en rayos X de baja energía puede ser usada para medir la dosis en otro irradiador de energía similar (150-225 keVp), pero no puede ser utilizada para mediciones en irradiadores de ^{60}Co o ^{137}Cs . Vea el apéndice A para conocer las diferencias entre radiación X y radiación Gamma.

3.2. Campo de radiación de referencia

Cuando la radiación ionizante golpea un contenedor de insectos en la cámara de irradiación, muchos de los fotones (150-225 keVp) 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 (menos de 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 los fotones 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. El equilibrio depende de la densidad y la composición atómica del material a través del cual la radiación pasa, de tal manera que diferentes materiales producirá diferente equilibrio. Para estandarizar el reporte de la dosimetría, la dosis es siempre expresada como dosis en agua, es decir, en un campo de electrones equilibrados producido por agua o material equivalente. Vea también el apéndice B, para una discusión sobre dosis en aire, dosis en agua y dosis en pupa.

Tanto los dosímetros durante la calibración como los insectos durante la irradiación deben ser rodeados por suficiente material de adecuada composición atómica y densidad (build-up material) para garantizar que un equilibrio de electrones equivalente al agua es establecido antes de que la radiación alcance la muestra o el dosímetro, ya que es este campo de electrones que principalmente causa ionización. Si no se hace esto, la superficie de la muestra puede recibir significativamente una dosis más baja o más alta que la esperada. Para fotones de rayos X de 150 keVp la distancia de equilibrio es acerca de 100 μm en agua o plástico, similar el PMMA o el material de soporte de poliéster de las películas Gafchromic™. Como el soporte de las películas es de acerca de 100 μm , éste proporciona el adecuado material de equilibrio (build-up) en ambos lados para la película MD-V3, pero para la película HD-V2, debido a su construcción asimétrica, uno de sus lados es expuesta directamente a la radiación ionizante. Por tanto, es muy sensible al medio que entra inmediatamente en contacto con el lado expuesto. Para asegurar consistencia y precisión en los resultados, las películas HD-V2 deben ser siempre colocadas con una cubierta adecuada, como sobres de papel (por ej. Sobres para dosímetros FWT-80²) para asegurar la presencia de suficiente material de equilibrio (build-up). Las películas MD-V3 pueden ser usadas desnudas pero es generalmente mejor colocarlas en un sobre para mantenerlas limpias.

Los irradiadores de rayos X de baja energía se basan en uno de dos tipos de tubos de rayos X. el tipo más común son a base de uno o dos tubos de rayos X. El tipo más común es el tubo de orto-voltaje estándar, generalmente con un tubo hacia abajo (Fig. 14a) o con dos tubos verticalmente opuestos (Fig. 14b). La salida de rayos X de estos tubos está limitada por la necesidad de eliminar el calor generado en el ánodo para evitar el sobrecalentamiento y el colapso de la estructura del tubo. Tales tubos producen un cono de radiación desde el ánodo con un ángulo de acerca 40°, el haz varía acerca del 10% en intensidad a través de esta área y fuera de ella cae rápidamente. Estos tubos también exhiben el "efecto de talón" por el cual la intensidad cae más rápido en el lado del haz que se aleja del cátodo debido a la absorción en el ánodo. Las muestras son colocadas sobre una plataforma bajo el haz y necesitan ser

² Suministrado por Far West Technologies Ltd, 330 South Kellogg Ave. Suite D, Goleta, CA 93117 USA, https://www.fwt.com/racm/accessory_ds.htm

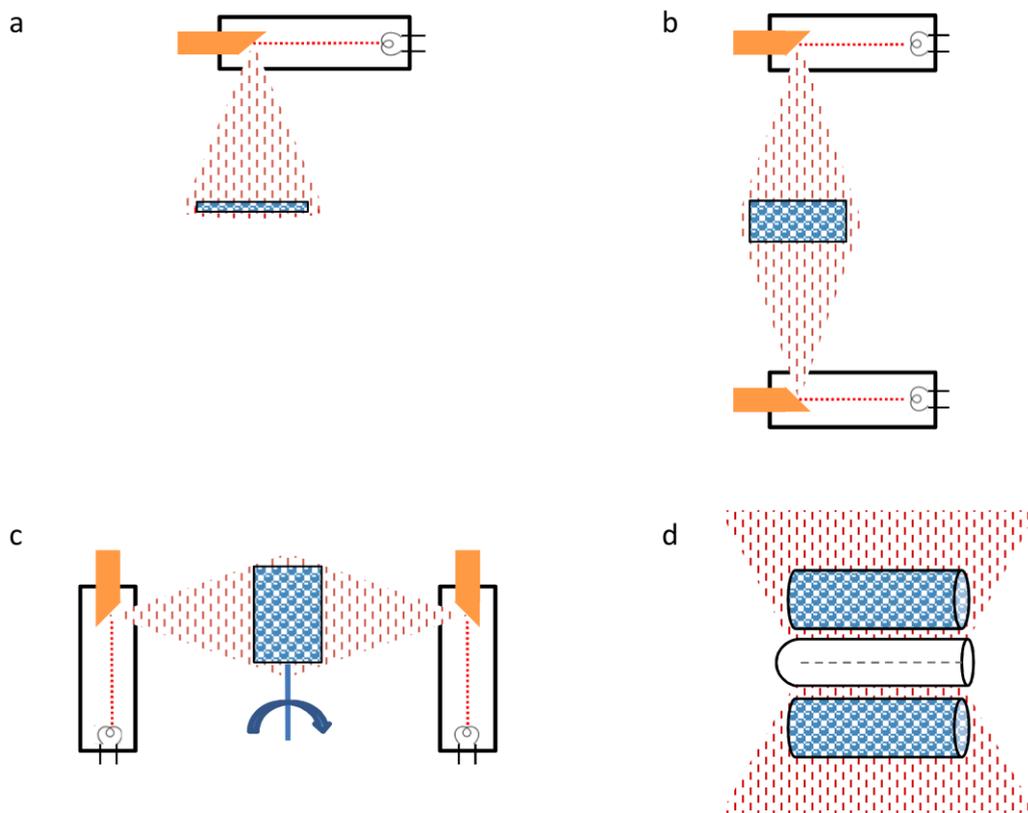


Figura 14. Están disponibles varias configuraciones de haz de Rayos-X. a) Haz vertical simple – debido a la atenuación del haz en la muestra, la profundidad útil en el haz está limitado a casi 10 mm (para su equivalencia en agua); b) dos haces verticalmente opuestos mejoran grandemente la distribución de la dosis dentro de la muestra, permitiendo irradiar un profundidad más grande de material (casi 50 mm agua-equivalente); c) haz horizontal simple o dual permite que la muestra gire sobre un eje vertical para mejorar la uniformidad de dosis, permitiendo un buen DUR para un contenedor de 120 mm de diámetro por 150 mm de alto; d) el tubo de Rad Source Technologies tiene un ánodo cilindrico alrededor de un filamento de cátodo extendido, de tal manera que los rayos-X son producidos sobre una superficie larga, emanando en todas direcciones, dando una tasa de dosis más alta hasta seis botes colocados cerca del tubo y girando alrededor del mismo (solo se muestran dos para mayor claridad).

centradas dentro del cono de radiación para evitar áreas de baja tasa de dosis; algunos sistemas incorporan también una tornamesa para reducir el impacto del efecto de talón. Con el fin de tener una área circular útil de 150 mm la muestra debe estar a unos 400 mm de la fuente de los rayos X dentro del tubo; debido a la ley de la inverso al cuadrado esto da como resultado una tasa de dosis baja de $2-3 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ para un solo haz. Debido a la atenuación del haz en el agua a 150-225 keV la profundidad útil en agua es alrededor de los 10 mm con un solo tubo y un solo lado de irradiación. La uniformidad de la profundidad mejora en gran medida mediante la irradiación de doble cara, ya sea con dos tubos o volteando la carga después de la mitad de la dosis.

Algunos sistemas diseñados específicamente para SIT tienen los tubos de rayos X arreglados con sus haces horizontales (Fig. 14c). Con esta configuración, un cilindro de aproximadamente 120 mm de diámetro y 150 mm de alto puede irradiarse con una DUR (tasa de uniformidad de dosis, por sus siglas en inglés) aceptable, incluso con un solo tubo. Además, la carga se puede dividir en dos partes colocadas una encima de la otra, para cambiar de posición después de la mitad de la dosis; esto mejora aún más el DUR.

El segundo tipo de tubo es el de diseño de cátodo axial de Rad Source Technology Inc., que consiste de un ánodo cilíndrico rodeando un filamento de cátodo (Fig. 14d). La radiación es emitida por transmisión a través del ánodo en todas direcciones en lugar de un haz confinado. Las muestras se mantienen en recipientes que giran alrededor del tubo para que sean irradiadas por todos los lados, mejorando la distribución de la dosis. La salida de rayos X de dichos tubos puede ser mayor que la de los tubos de ortovoltaje convencionales, ya que el ánodo cilíndrico delgado permite que el calor creado durante la generación de rayos X pueda ser removido más eficientemente. Debido a la gran superficie de emisión, las muestras se pueden colocar muy cerca del tubo para recibir altas tasas de dosis y el tubo tiene una filtración inherente significativa, lo que aumenta la energía efectiva del haz y, por lo tanto, la penetración y la uniformidad de la dosis en recipientes de mayor diámetro.

3.3. Condiciones de irradiación de referencia

3.3.1. Geometría de irradiación

La tasa de dosis es establecida por el proveedor del irradiador durante la puesta en servicio del equipo. Subsecuentes chequeos pueden ser realizados por el usuario mediante el uso de un apropiado sistema de dosimetría estándar de referencia o de transferencia.

La tasa de dosis depende del producto en el contenedor, la geometría de irradiación, el lugar de la medición de dosis y el voltaje del tubo y la corriente (mA). La determinación de la tasa de dosis debe ser llevada a cabo en las condiciones de irradiación que se esperan tener durante las irradiaciones de rutina donde todos los contenedores son llenados con insectos. Las mediciones deben ser hechas con el mismo voltaje y corriente que serán usadas para exposiciones de rutina; para mantener el rendimiento es probable que estos sean los máximos valores permisibles. Siempre es deseable utilizar el modo de rotación para hacer estas mediciones; sin embargo esto no es práctico con una cámara de ionización debido a que el

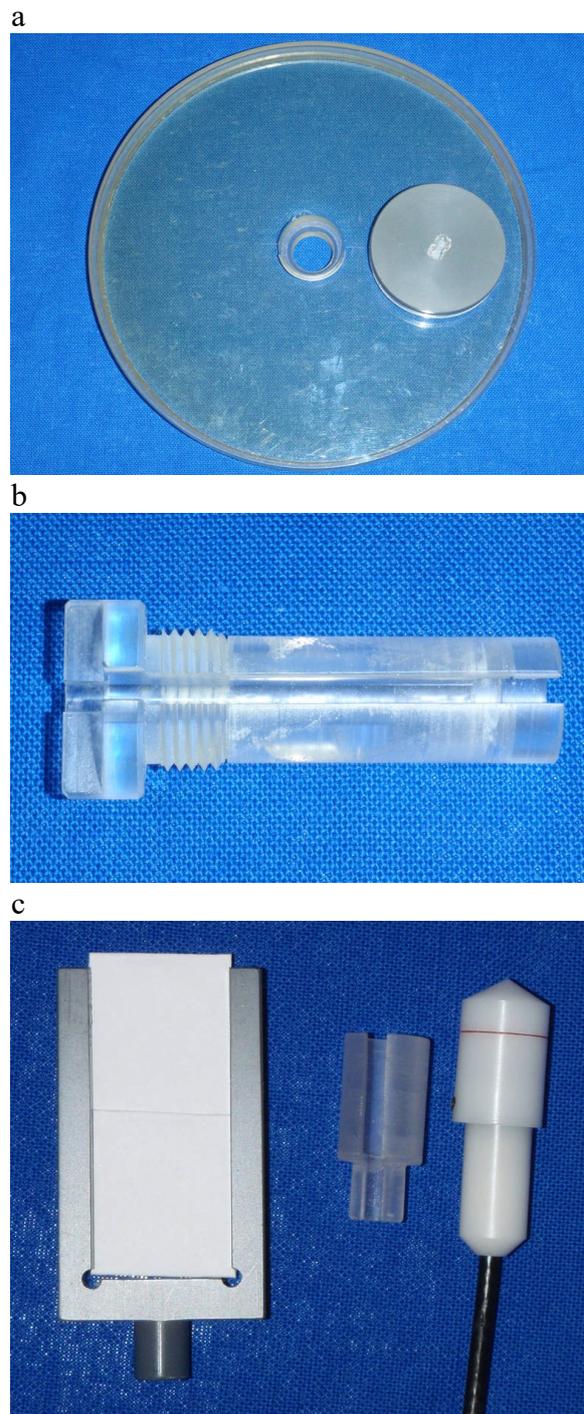


Figura 15. Sistema para la colocación de los dosímetros en el contenedor: a) Tapa del contenedor; b) adaptador para centrar los soportes en el contenedor; c) adaptador para la cámara de ionización, y sobres para dosímetros; sistema ensamblado con la cámara de iones.

cable va al electrómetro. Para la determinación de la tasa de dosis, el electrómetro debe funcionar en modo "dosis integrada" y, de la misma forma, para la calibración Gafchromic, las películas no deben girarse.

Durante la calibración del sistema dosimétrico, puede usarse en los contenedores un producto que simule a los insectos. El arroz instantáneo parece simular las pupas muy de cerca con respecto a la atenuación de la radiación y las propiedades de dispersión (principalmente por su densidad similar y su composición elemental) (ver Apéndice C). Sin embargo, no se puede utilizar un producto simulado para determinación de la tasa de dosis que se usará para la irradiación rutinaria de insectos.

Es importante que la tasa de dosis sea bastante uniforme en la ubicación seleccionada como punto de referencia donde se medirá la tasa de dosis con el sistema de dosimetría estándar de transferencia o de referencia, por ejemplo, en el centro del recipiente para el modo de operación giratorio. Sin embargo, una vez que el modo rotatorio no es práctico para la cámara de ionización, es esencial que los dosímetros Gafchromic (para irradiación de calibración) sean colocados en el lugar preciso donde la tasa de dosis fue determinada. Esto requiere dispositivos especialmente diseñados para mantener estos dosímetros y asegurar la colocación del contenedor en una posición fija y reproducible.

La figura 15 muestra un arreglo para la irradiación de la cámara de ionización en el irradiador RS2400. Éste está diseñado para cumplir los requerimientos específicos de la cámara de ionización, descritos en el apéndice D:

- la cámara de ionización debe estar en contacto directamente con el material irradiado (pupa o arroz instantáneo),
- los cables deben estar conectados a un electrómetro que está situado fuera del irradiador,
- la cámara de ionización, al ser del tipo de aire libre, debe estar protegida contra cualquier partícula o polvo del material circundante que ingrese a la cavidad, y
- siendo del tipo de aire libre también requiere que la cavidad de la cámara de ionización esté "abierta" a la atmósfera de manera que la temperatura y la presión dentro de la cavidad representen las condiciones ambientales.

La figura 15^a muestra la tapa del recipiente especialmente diseñada que se utiliza para la irradiación de ambos tipos de dosímetros (tanto para la cámara de ionización como para las películas Gafchromic para propósitos de calibración). Esta tiene un agujero central roscado en donde se acomoda un adaptador para el soporte del dosímetro. En otra parte de la tapa tiene otro orificio para meter el producto después de que la tapa ha sido colocada. La figura 15^b muestra un adaptador el cual es atornillado en uno de los extremos a la tapa y en el otro extremo toma el adaptador del dosímetro ya sea para la cámara de ionización o para la película dosimétrica. La figura 15^c muestra el soporte para la cámara de ionización también como para los dosímetros de película Gafchromic de tal manera que están precisamente en la misma ubicación (en el centro del contenedor). Todos los dispositivos están fabricados de PMMA (acrílico, Plexiglas®, Lucita® etc.). Para proteger la cámara de ionización de cualquier partícula, también se recomienda envolverlo con una funda fina; lo mejor es usar una parte cortada de un guante quirúrgico de goma (ya sea un dedo o el pulgar). Ésta cubierta protectora debe ser colocada de tal manera que el aire circule libremente para asegurar la igualdad de presión.

3.3.2. Temperatura de irradiación

La respuesta de la cámara de ionización (para una dosis dada) es directamente proporcional a la masa de aire en la cavidad, la cual depende de la presión y la temperatura. Entonces se recomienda manejar el electrómetro en el modo de compensación de temperatura y presión.

3.4. El dosímetro estándar de transferencia

Actualmente el único dosímetro estándar de referencia que llena las condiciones necesarias es la cámara de ionización; por lo tanto, los siguientes procedimientos son específicos para mediciones con cámara de ionización. Se recomienda utilizar una cámara de ionización tipo Farmer de $0.18/\text{cm}^3$ (tales como la cámara de ionización³ tipo dedal $10 \times 6 - 0.18$) o la cámara de ionización tipo aire libre de $0.06/\text{cm}^3$ ($10 \times 6 - 0.6$), junto con un electrómetro para estas mediciones (ver Apéndice D). Esta debe ser calibrada para los fotones de energía relevantes con trazabilidad a un estándar nacional o internacional

La hoja de acompañamiento en formato de Microsoft Excel, disponible en la página del OIEA, contiene todos los formatos con fórmulas para hacer los cálculos necesarios automáticamente (los archivos no contienen macros). Esta hoja de cálculo debe ser usada para los siguientes procedimientos. Los formularios para cálculos manuales se pueden imprimir desde el libro de trabajo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Characterization of the irradiator												
2	Dose Rate (DR) Measurement with Reference Dosimetry												
3	System (Ionization Chamber)												
4	Date:	2020-11-20											
5	Operator:	YGS											
6	Irradiator type and serial number	Raycell MK2 s/n 163											
7	Irradiator location	IPCL, Seibersdorf											
8	Reference dosimetry system												
9	Ionization Chamber and ser. No.	10-6-0.18 01-0005											
10	Digitizer	9660A 01-2557											
11	Electrometer	Accu Dose 27-0016											
12	Settings	Automatic											
13	Calibration date	2015-08-01											
14	Ion chamber calibration factor	1											
15	Reference system uncertainty $U_{\text{Ref}}(\%)$	1.6											
16	Reference irradiation conditions												
17	Operating voltage	kV 160											
18	Operating current	mA 25											
19	Energy absorption ratio	water/air 1.05											
20	Product in all canisters	None											
21	Ionization chamber location	Center of canister											

Figura 16. Formato - SIT3A

Iniciando con el Formato SIT-3A, introduzca la información requerida en las celdas amarillas de las líneas 4 a 21 incluyendo el modelo y número de serie de todos los componentes utilizados en la calibración (Fig. 16). Como la cámara de iones está llena de aire y la dosis se expresa convencionalmente como dosis al agua, es necesario corregir la lectura de la cámara de iones con la relación de los coeficientes de absorción de energía para aire y agua, disponible de NIST [19]. La relación depende de la energía efectiva del haz de rayos X (no de la energía máxima). La energía efectiva es aproximadamente un tercio de la máxima energía, pero esto depende de la cantidad de filtración de endurecimiento utilizada. Para el RS2400 la energía efectiva es acerca de 60 keV [15]. La relación de energía de absorción del agua al aire puede ser estimada a partir de la Fig. 17 para energías efectivas de 20 a 200 keV (energías máximas de aproximadamente 60 – 600 keV), dando un valor de

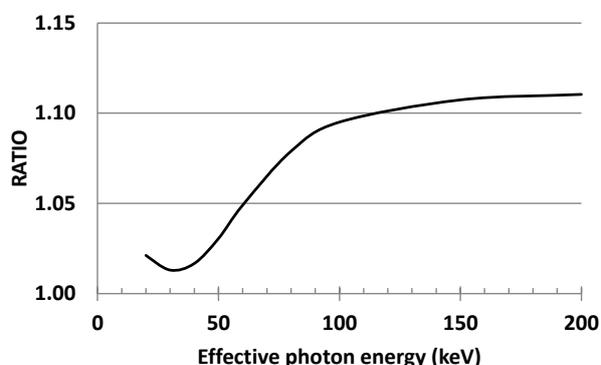


Figura 17. Relación de los coeficientes de absorción de energía del agua y del aire frente a la energía fotónica efectiva.

³ Suministrado por RadCal 426 West Duarte Road, Monrovia, California 91016, USA. www.radcal.com

1.05 para el RS2400, y este valor debe ser introducido en la celda G19. Ver también el Apéndice D.

Preparación del contenedor

- 1). Conecte la cámara de ionización (que se ubicará dentro del irradiador) al electrómetro ubicado fuera del irradiador.
- 2). Pase la cámara de ionización a través del orificio central de la tapa y coloque los cables en la ranura del adaptador provisto para tal fin.
- 3). Atornille el adaptador a la tapa.
- 4). Monte el soporte de la cámara de ionización en el adaptador y conecte la cámara de ionización al soporte.
- 5). Fije la capa protectora de nailon alrededor de la cámara de ionización y fjela al adaptador de manera que haya paso de aire claro entre la cavidad de la cámara de ionización y la atmósfera exterior.

3). Llene el recipiente con pupas o arroz instantáneo hasta aproximadamente la mitad y luego cierre la tapa asegurándose de que la cámara de ionización esté en el centro del recipiente.

4). Asegure la tapa al contenedor con 3 o 4 cintas.

5). Llene el recipiente restante a través del orificio adyacente de la tapa, asegurándose de que el recipiente esté bien cerrado.

6). Cierre el orificio de la tapa.

7). Coloque el contenedor en la posición del rotor asegurándose de que los cables de la cámara de ionización están libres de cualquier obstrucción.

Dose rate in air											
Irradiation		From electrometer				Measured				Dose	
Time ¹		cal	kPa	T °C	T °C	min	sec	Dose _{air} (Gy)	Dose _w (Gy)	Dose Rate Gy/min	
6.0		1.00	101.3	22.0	22.0	6.0		47.75	50.14	8.34	
9.0		1.00	101.3	22.0	22.0	9.0		70.74	74.28	8.24	
12.0		1.00	101.3	22.0	22.0	12.0		94.31	99.03	8.25	
15.0		1.00	101.3	22.0	22.0	15.0		118.00	123.90	8.25	
18.0		1.00	101.3	22.0	22.0	18.0		141.10	148.16	8.22	
21.0		1.00	101.3	22.0	22.0	21.0		163.70	171.89	8.17	
24.0		1.00	101.3	22.0	22.0	24.0		186.80	195.96	8.17	
27.0		1.00	101.3	22.0	22.0	27.0		210.40	221.97	8.21	
									Mean ¹	8.23	
									Uncertainty [u ₉₅ (%)]	0.66	
37 When was the last time the DR was measured:											
38 Same irradiation conditions?											
39											
40 What was the value then?											
41											
42 Any other remarks:											
43											
44 ¹ Time can be entered in minutes and decimal (2.1), minutes and seconds or seconds (up to 999 seconds)											

Figura 18. Formato SIT-3A

Proceso de irradiación

8). Programe los parámetros de operación del irradiador al máximo posible, (150 kV 45 mA para el RS2400), con un tiempo de irradiación de 5 min / 300 s y en modo estacionario (rotación apagada).

9). Programe el electrodo en modo ‘dosis acumulada’. Registre el factor de calibración, presión y temperatura en el Formato SIT-3A (Fig. 18). Inicie las mediciones.

10). Encienda el irradiador inmediatamente.

11). Inmediatamente que el proceso de irradiación ha sido completado (después del tiempo establecido), detenga la acumulación de dosis del electrodo.

12). Registre la dosis del electrómetro (Gy para aire) y el tiempo en el Formato SIT-3A (Fig. 18). La dosis en agua será entonces calculada multiplicando el valor de la dosis en aire por 1.05 para 150/160 kV. El factor de corrección para otras energías puede ser estimado a partir de la Fig. 17.

13). La tasa de dosis será entonces calculada como la relación entre la dosis en agua y el tiempo de irradiación.

14). Repita los pasos del 9 al 13 varias veces (un mínimo de cinco).

15). Calcule la media y la desviación estándar para los valores de tasa de dosis.

16). El coeficiente de variación ($100 \times \text{std dev}/\text{media}$) representa la incertidumbre en el valor de la tasa de dosis. Este valor es introducido en el Formato SIT-FORM-9 como u_{dr} . Este valor debe ser menor a 1%.

El valor medio es la tasa de dosis del irradiador para estas condiciones de operación y para el producto en particular en los recipientes.

3.5. Frecuencia de la medición de la tasa de dosis

La tasa de dosis debe ser medida anualmente o antes si se altera cualquier parte relevante del sistema de irradiación, tales como reemplazo del tubo de rayos X, o la programación de irradiación que pueda afectar la tasa de dosis.

4. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DOSIMÉTRICO 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.

La información acerca del sistema de dosimetría actual es listada en el Formato SIT-9.

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 y dosis. Cada uno de estos pasos se discute posteriormente.

4.1.1. Irradiación

Irradie los dosímetros Gafchromic™ en la misma ubicación de referencia donde se determinó la tasa de dosis y bajo las mismas condiciones de irradiación. El rango de electrones secundarios que son generados por los fotones de baja energía es extremadamente corto, aproximadamente 0.1 mm en agua. Por lo tanto, los electrones que alcanzan la región sensible de la película dosimétrica están muy influenciados por el material de la envoltura en la que se coloca durante la irradiación. (ver Apéndice E). Es, por lo tanto importante que el dosímetro sea colocado en el mismo tipo de sobre utilizado tanto para la medición de dosis de rutina como para la calibración. Uno de estos sobres es el sobre de papel blanco pequeño (2,5 cm x 2,5 cm) suministrado por FWT Technology, Inc., sin embargo, cualquier sobre de papel es aceptable. Además, no debe colocarse más de un dosímetro en el mismo sobre. Para irradiación de calibración, utilice dos de estos sobres para mantener en cada uno de ellos una película de 2cm x 2cm. Coloque estos dos sobres en el soporte del dosímetro (Fig. 15c) y conéctelo al adaptador (Fig. 15b) reemplazando el soporte de la cámara de ionización.

Como la respuesta de la película Gafchromic™ es casi logarítmica, seis dosis de calibración deben ser seleccionadas en una secuencia aproximadamente geométrica. La incertidumbre final de la calibración será afectada por el intervalo de dosis usado 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 aún puede ser obtenida una incertidumbre razonable. Para esterilidad F1 donde son

	A	B	C	D	E	F	G
1							Form-SIT-4A
2	Gafchromic Dosimetry System Calibration: Irradiation						
3							
4	Date:	2020-11-30					
5							
6	Operator:	YGS					
7							
8	Reference irradiation conditions:	Centre of canister					
9	(should be the same as those for the dose energy ratio measurement (Form-SIT-3A))						
10							
11							
12							
13	Dose Rate in air (from Form-SIT-3):					8.23	Gy per minute
14	Anode voltage					160.0	kV
15	Set Current					25.0	mA
16							
17							
18							
19							
20	Filter	590nm					
21							
22	Required Dose (Gy)	Calculated time ¹		Actual time ²		Dose (Gy)	
23		min	sec	min	sec		
24	50	6.1	364	6.1			50.2
25	60	7.3	437	7.3			60.1
26	80	9.7	583	9.7			79.9
27	100	12.1	729	12.1			99.6
28	120	14.6	875	14.6			120.2
29	150	18.2	1093	18.2			149.9

Figure 19. Formato SIT-4A

requeridas altas dosis o para mosquitos donde se requieren dosis más bajas, se deben ajustar los intervalos apropiadamente. Coloque estos valores en la columna 1 en el Formato SIT-4A (Fig. 19). Éste, calculará los valores de tiempos correspondientes:

$$\text{Tiempo calculado (min)} = \text{Dosis (Gy en agua)} / \text{Tasa de dosis (Gy/min)}$$

Para los parámetros de operación del irradiador, seleccione el mismo voltaje y amperaje utilizado para la determinación de la tasa de dosis y apague el modo rotacional si su equipo cuenta con esta modalidad.⁴

Irradie cada par de dosímetros de 2 x 2 cm a los tiempos calculados. Registre el valor del tiempo real de irradiación en el Formato SIT-4A, ya que por cualquier razón, éstos podrían ser diferentes a los tiempos programados.

Después de la irradiación, corte cada película de 2cm x 2cm film en 4 piezas (cada una de 1cm x 1cm) y colóquelo dentro del sobre para guardarlos de manera segura. Debido a que el color desarrolla con el tiempo, mida la DO de los dosímetros *entre las 20 a 28 horas después de la irradiación*. (Sección 2.3.3).

Mida la DO de cada película dosimétrica siguiendo los procedimientos dados en las Secciones 2.2.4. y 2.2.5. Para cada punto de dosis, habrá dos juegos de 4 valores de DO. Registre todos los valores en la hoja CalData. Primero, mida la DO de los tres dosímetros ND neutrales antes de iniciar la lectura de los dosímetros. En seguida, lea la DO de 10 dosímetros no irradiados de 1 x 1 cm para registrar la lectura de fondo. Lea cada juego de dosímetros en secuencia y al final repita la lectura de los filtros de densidad neutral ND.

H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
Gafchromic Dosimetry System Calibration: Response Determination											Form-SIT-4B	
Film reader s/n: S/N: 12348						Film batch ID: 08252001						
Date: 2020-11-30												
Analysed by: YGS												
			ND0.5	ND1.0	ND2.0							
Start			0.494	0.969	2.036							
Finish			0.493	0.981	2.039							
Dose (Gy)	OD (mean)				OD (std dev)	CV(%)	Resp. ¹ (R)	R(mean) ²				
26	A: 0.370 0.380 0.369 0.371				0.372	0.0054	1.4%	0.154	0.152			
26	B: 0.362 0.367 0.380 0.365				0.368	0.0083	2.3%	0.150				
21	A: 0.484 0.488 0.478 0.498				0.487	0.0085	1.8%	0.269	0.269			
22	B: 0.498 0.477 0.485 0.487				0.487	0.0087	1.8%	0.269				
23	A: 0.581 0.562 0.577 0.588				0.577	0.0108	1.9%	0.359	0.360			
24	B: 0.586 0.570 0.582 0.577				0.579	0.0070	1.2%	0.361				
25	A: 0.658 0.645 0.635 0.661				0.650	0.0122	1.9%	0.432	0.435			
26	B: 0.662 0.659 0.649 0.658				0.657	0.0059	0.9%	0.439				
27	A: 0.715 0.732 0.708 0.722				0.719	0.0102	1.4%	0.501	0.500			
28	B: 0.725 0.710 0.722 0.715				0.718	0.0067	0.9%	0.500				
29	A: 0.790 0.781 0.781 0.750				0.776	0.0175	2.3%	0.558	0.558			
30	B: 0.752 0.789 0.779 0.788				0.777	0.0170	2.2%	0.559				

Figura 20. Formato SIT-4B

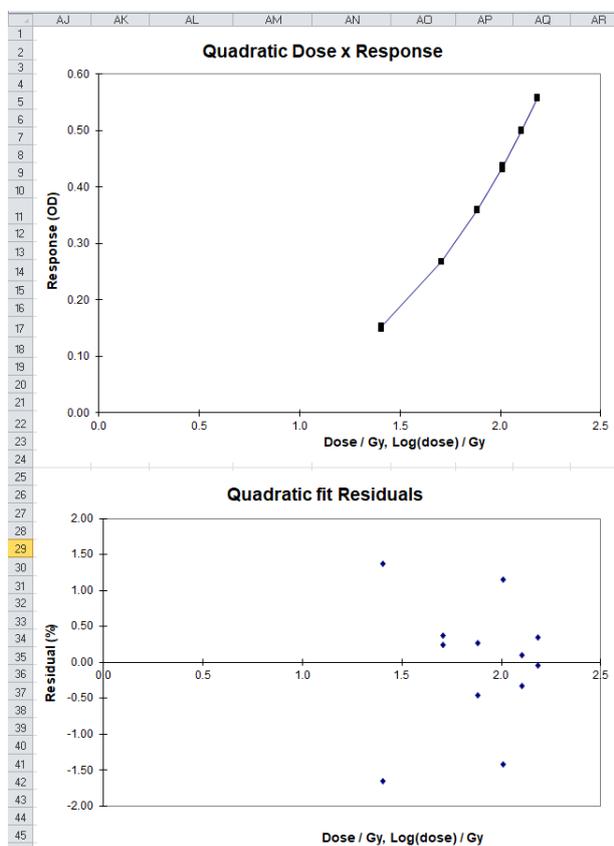


Figura 21. Ejemplo de la gráfica residual. Arriba esta la curva de regresión (cuadrática en este caso contra log(dosis)) con la gráfica residual abajo.

⁴ Cuando se dispone de rotación, esto mejora la uniformidad de la dosis, pero no debe utilizarse durante este paso de calibración, ya que puede cambiar la tasa de dosis de la medida por la cámara de iones.

La DO_{media} , $DO_{std\ dev}$ y $CV(\%)$ por cada juego de cuatro valores de DO son determinados por la hoja de cálculo. También se calcula la respuesta (R) para cada DO_{media} :

$$R = DO_{media} - DO(\text{fondo})$$

Donde, DO (fondo) es el valor medio de la DO de las películas dosimétricas no irradiadas (Formato SIT-2) el cual es válido para el lote completo de dosímetros (ver Sección 2.3.7). R_{media} es el valor medio para los dos valores de R para cada punto de dosis (Formato SIT-4B) (Fig. 20).

4.1.2. Relación de calibración

Los valores de Dosis, R y R_{media} son transferidos del Formato SIT-4B al Formato SIT-4C.

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

Para el análisis gráfico, grafique R_{mean} sobre el eje de las “y” vs Dosis sobre el eje de las “x” como se da en el Formato SIT-4C. Dibuje una curva suave a través de todos los seis puntos. Esta curva puede ser ligeramente no-lineal.

Para análisis de regresión, la hoja de cálculo utiliza los dos valores de R (parámetro-y) para cada valor de dosis (parámetro-x, Fig. 21). La relación es casi lineal, pero el ajuste cuadrático o de series de potencia puede ser mejor. Las relaciones de calibración pueden ser descritas como:

Función lineal: Respuesta = a + b (Dosis)

Función cuadrática: Respuesta = c + d (Dosis) + e (Dosis)²

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

La selección entre estas tres puede ser hecho observando la distribución del porcentaje residual para los tres casos como se muestra en el Formato SIT-4D (Fig. 22), donde los residuales son calculados de la manera siguiente:

1. Correspondiente a cada uno de los dos valores de respuesta (R), D_{calc} es calculado para las seis irradiaciones (como se da en la columna 2 del Formato SIT-4C):

Función lineal: $D_{calc} = (R - a) / b$

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

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

Log(dose) Gy	Linear Rel.		Quadratic Rel.		Power Series Rel.	
	D_{calc}^2	Resid.(%) ²	D_{calc}^3	Resid.(%) ³	D_{calc}^4	Resid.(%) ⁴
1.41	A: 1.45 B: 1.44	A: 10.63 B: 8.72	A: 1.41 B: 1.40	A: 1.38 B: -1.66	A: 1.41 B: 1.40	A: 1.56 B: -1.29
1.67	A: 1.67 B: 1.67	A: -8.01 B: -8.12	A: 1.71 B: 1.71	A: 0.37 B: 0.25	A: 1.71 B: 1.71	A: -0.18 B: -0.30
1.88	A: 1.84 B: 1.85	A: -8.75 B: -8.02	A: 1.88 B: 1.89	A: -0.45 B: 0.27	A: 1.88 B: 1.89	A: -0.45 B: 0.28
2.01	A: 1.98 B: 2.00	A: -5.50 B: -2.46	A: 2.00 B: 2.01	A: -1.41 B: 1.15	A: 2.00 B: 2.01	A: -1.21 B: 1.37
2.11	A: 2.12 B: 2.11	A: 2.65 B: 2.06	A: 2.11 B: 2.10	A: 0.10 B: -0.33	A: 2.11 B: 2.11	A: 0.26 B: -0.17
2.19	A: 2.23 B: 2.23	A: 9.86 B: 10.48	A: 2.18 B: 2.19	A: -0.04 B: 0.35	A: 2.18 B: 2.19	A: -0.09 B: 0.30
		U_{fit} 7.717		0.850		0.818

Figura 22. Formato SIT-4D con el ajuste U_{fit} resaltado y arriba seleccionado.

Estos valores están mostrados en el Formato - SIT-4D, columna 2, 4 y 6.

2. De estos valores, el porcentaje residual para cada punto es determinado por:

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

Donde, D es el valor actual de la dosis proporcionada (como se da en la columna 1 del Formato SIT-4D Fig. 22.). Nota: el valor del (%) residual puede ser positivo o negativo.

3. Estos valores del (%) Residual están mostrados en el Formato SIT-4D (columna 3, 5 y 7).

4. Las gráficas de los Residuales (%) (Sobre el eje-y) contra Dosis (sobre el eje-x) son mostradas en la hoja de cálculo para el ajuste lineal y también para el cuadrático y de series de potencia. Verifique la distribución de los puntos en las gráficas para checar cualquier valor atípico residual (%) (Fig. 21).

La incertidumbre que surge del procedimiento de ajuste (u_{fit}) es calculada como el valor residual de la raíz cuadrada media 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 (12), y la sumatoria se lleva a cabo sobre todos estos valores. Los valores U_{fit} son mostrados para cada relación en el formato Form-SIT-4D.

Mientras observa los valores de U_{fit} al pie de la tabla en el Formato SIT-4D, pruebe los diferentes botones de opción en Seleccionar longitud (es) de onda y seleccione la caja Transformar para encontrar la combinación que dé el valor más bajo de U_{fit} . Seleccione la opción correspondiente “Select fit” en el área gris para la relación que produce el valor más bajo de U_{fit} . Este valor es también introducido en el Formato - SIT-9 y será utilizado más tarde en la Sección 4.3

Esta relación de calibración es válida por un año para ese lote específico de dosímetros y por la temperatura empleada para las irradiaciones, $T_{\text{cal}} \pm 5$ °C. La siguiente información es entonces introducida en el Formato SIT-9: la fecha de calibración, la temperatura de irradiación de calibración, T_{cal} y la relación de calibración.

4.1.4 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. Homogeneidad del lote de dosímetros

Es importante determinar el grado de homogeneidad de respuesta para los dosímetros que pertenecen a un lote ya que afecta la precisión general de los valores de dosis medidos. Para cada lote, esto se determina irradiando varios dosímetros seleccionados al azar del lote a la misma dosis, siguiendo el procedimiento siguiente:

1. Corte dos piezas de 2 x 2 cm de la hoja de dosímetros de película (lote actual).
2. Coloque cada pieza separadamente en un pequeño sobre para irradiación.
3. Coloque estos sobres juntos en la misma ubicación dentro del contenedor lleno de pupa (o arroz instantáneo) donde se espera que la dosis sea uniforme (por ejemplo, en el centro del contenedor).
4. Irrádielos a una dosis aproximada de 100 Gy. El valor exacto de la dosis no es importante. Sin embargo, es muy importante que ellos reciban *la misma* dosis.

5. Corte cada pieza en cuatro dosímetros de 1 x 1 cm y determine la respuesta de cada dosímetro siguiendo la Sección 2.2.5. Asegúrese que los valores son insertados en el lugar correcto en la hoja CalData.
6. La media y la desviación estándar de estos ocho valores de respuesta son calculados. Subsecuentemente, el coeficiente de variación es determinado:

$$CV (\%) = (\text{desviación estándar/valor medio}) \times 100.$$

El valor de CV es para la respuesta de los dosímetros; sin embargo, dado que la relación entre la respuesta de los dosímetros y la dosis absorbida es casi lineal, se puede suponer que el valor de CV para dosis es el mismo que para la respuesta. Este valor de CV (%) es insertado en el Formato SIT-9 como u_{lot} . Cuanto menor sea el valor CV (%), mayor será la precisión (mejor) del valor de la dosis medida.

4.3. 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

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. Y luego las fuentes de incertidumbre restantes deben ser evaluadas. Esto es hecho más fácilmente considerando a su vez, cada paso en la calibración y el uso de un dosímetro, 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.

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^o):

- u_{ref} : derivado del sistema de dosimetría de referencia (cámara de ionización)
- u_{dr} : derivado de la incertidumbre de la medición de la tasa de dosis del irradiador,
- u_{fit} : derivado de la incertidumbre en la relación de calibración (ver Sección 4.1.2.),
- u_{lot} : derivado de la falta de homogeneidad de los valores del lote (= CV(%)) del Formato SIT-6, ver Sección 4.2). Si “n” dosímetros son usados en una ubicación para medir la dosis, la incertidumbre en el valor medio de la dosis medida es reducida por \sqrt{n} . por lo tanto, este componente de incertidumbre para “n” dosímetros es = $CV(\%)/\sqrt{n}$.
- u_{temp-r} : derivado de la incertidumbre en la temperatura durante el procedimiento de lectura de la DO. Suponiendo que la temperatura del dosímetro durante la lectura está dentro de $\pm 5^\circ C$ de la temperatura durante la calibración, la incertidumbre en el valor medido de la respuesta del dosímetro (y por lo tanto la dosis) es $u_{temp-r} = 0.7 \times 5 / \sqrt{3}$ (~ 1%) donde, 0.7%/°C es el coeficiente de temperatura de lectura según lo estimado en el laboratorio del OIEA. El factor de $\sqrt{3}$ se basa en el supuesto de que la temperatura del dosímetro tiene una distribución de probabilidad rectangular dentro de los dos límites [3]. Calcule este valor y regístrelo en el Formato SIT-9.

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

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

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 ser multiplicada 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 $D_{\text{medida}} \pm 2u_{\text{total}}$.

4.4. Características del sistema de dosimetría actual

Introduzca los valores determinados anteriormente considerando las siguientes características en el Formato SIT-9:

- Identificación (ID) del lote de dosímetros (viene en la caja de dosímetros recibido de Ashland),
- Calibración del sistema de dosimetría (relación de calibración, fecha y temperatura),
- Respuesta de dosímetros de fondo (blancos), y
- Valores de incertidumbre.

4.5. Uso de la relación de calibración

Para medir la dosis en un punto, siga el siguiente procedimiento. Use el Formato SIT-6.

1. Inserte en un sobre de papel un dosímetro de 1cm x 1cm del lote calibrado y colóquelo en un punto de interés. Varios de estos sobres pueden colocarse en un lugar para reducir la incertidumbre en el valor de la dosis medida. No debe colocarse más de un dosímetro en cada sobre; sin embargo, una película grande (por ejemplo, 2x2 cm) puede ser colocada en un sobre y cortada en cuatro dosímetros después de la irradiación.
2. Irradie la muestra (con los dosímetros).
3. Mida la DO de los dosímetros siguiendo los procedimientos de la sección 2.2.4.arriba. Asegúrese que el cursor está en la celda de color amarillo oscuro del Formato SIT-6 (celda P4) para que los datos del lector se ingresen en la hoja. (Nota: las mediciones debes ser realizadas entre 20 a 28 horas después de la irradiación):

5. MEDICIÓN DE LA 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 lleva 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 los insectos [4]. Vea la Sección 6.3 y el Formato SIT-8B para los ejemplos de parámetros de proceso.

Use el Formato SIT-7 para el registro de datos.

Si se utilizó arroz instantáneo para la calibración del sistema de dosimetría Gafchromic y así también para la determinación de la tasa de dosis (TD), es esencial determinar nuevamente la TD para los insectos antes de llevar a cabo el ‘Proceso de Calificación’.

5.2. 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 a través de la muestra irradiada sea lo más uniforme posible. Para medir la distribución de la dosis en la muestra, colocar 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 las pupas.

5.3. 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, sin embargo, coloque más dosímetros en las regiones donde se esperan las dosis extremas de acuerdo a los resultados anteriores o del análisis teórico. Alternativamente, tiras largas u hojas de películas Gafchromic pueden ser utilizadas. Si alguna porción de las pupas está recibiendo dosis demasiado alta o demasiado baja para la aplicación en mención, algunos cambios necesitan ser llevados a cabo antes que se haga la irradiación a gran escala.

La distribución de la dosis depende de la configuración de la carga (cantidad y distribución de los insectos y los recipientes) dentro del irradiador. Tiene que realizarse un mapeo de dosis separado para cada configuración de carga que se use.

5.4. Ubicación de monitoreo de dosis

Para el control del proceso durante la irradiación de rutina, en ocasiones es necesario colocar dosímetros dentro 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 uno o más dosímetros 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 carga y debe ser determinada para cada configuración usada. Para reducir la incertidumbre en el proceso, el gradiente de dosis en esta ubicación no debería ser significativo.

5.5. Mapeo de dosis mediante escaneo de películas

Se encuentra disponible un documento separado que describe el procedimiento para mapear la dosis usando un escáner [12].

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 que cada contenedor⁵ fue irradiado. Estas medidas de control del proceso deben estar respaldadas cuando sea apropiado, por ensayos periódicos del nivel de esterilidad alcanzado.

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 de 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, velocidad y rotación del contenedor y los valores del nivel de potencia (kV y mA).

Utilice el Formato SIT-8B para el registro de datos.

6.4. Indicadores sensibles a la radiación

Deben colocarse indicadores sensibles a la radiación apropiados en cada envase antes de la irradiación. Verifique el estado del indicador antes e inmediatamente y después de la irradiación. El uso de estos indicadores ayuda para mantener separados los contenedores irradiados de los no irradiados. Sin embargo, también en el lugar debe haber un procedimiento administrativo para identificar los contenedores irradiados.

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

⁵ El *contenedor de embalaje* es un recipiente como un vaso de papel con tapa, una bolsa de plástico o una botella de plástico que se utiliza para mantener los insectos criados en fábrica durante la irradiación y, normalmente, durante el posterior envío desde la instalación de irradiación hasta el lugar de liberación. Por otro lado, *el bote* es el contenedor de fibra de carbono duradero y reutilizable que se utiliza para mantener los envases de los insectos criados en fábrica en el irradiador durante el proceso de irradiación.

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 las formas adecuadas para hacer sus registros consistentes tales como los formatos dados en 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 Gamma*, IAEA, Vienna, Austria (2022) <https://www.iaea.org/sites/default/files/22/02/gamma-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 X de Baja Energía*, IAEA, Vienna, Austria (2022) <https://www.iaea.org/sites/default/files/22/02/x-ray-sop-es-excel-embedded.pdf>.
- [14] MEHTA, K., PARKER, A., Characterization and dosimetry of a practical x-ray alternative to self-shielded gamma irradiators, *Radiat. Phys. Chem.* **80** (2011) 107

- doi:10.1016/j.radphyschem.2010.08.011.
- [15] ASHLAND, Gafchromic™ HD-V2 Film Specification and User Guide, <http://www.gafchromic.com/documents/gafchromic-hdv2.pdf>.
- [16] YAMADA, H., PARKER, A., Gafchromic™ MD-V3 and HD-V2 film response does not depend on temperature at time of exposure, *Radiat. Phys. Chem.* **196** (2022) 110101 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969806X22001438>.
- [17] 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>.
- [18] NIST, Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 KeV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>.
- [19] HALL, E.J., *Radiobiology for the Radiologist*, 4th ed., J.B. Lippincott Co., Philadelphia (1994).

BIBLIOGRAFÍA

Normas⁶

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

Otras publicaciones

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Dosimetry for food irradiation*, Technical Reports Series no. 409, IAEA, Vienna, Austria (2002). http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS409_scr.pdf

⁶ 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). Estas normas son generalmente actualizadas casi cada cinco años; por favor revise la última versión.

APÉNDICE A

Radiación X vs radiación gamma

A.1 General

La radiación X y la radiación gamma son parte del espectro de radiación electromagnética, el cual también incluye las ondas de radio, infrarrojo la luz visible y la luz ultravioleta. Así como decimos que la materia está formada por átomos, la radiación electromagnética está "formada" por fotones. La diferencia entre los diversos componentes de la radiación electromagnética, p. Ej. Ondas de radio, luz visible y radiación gamma, es solo su longitud de onda; cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es el nivel de energía. La energía asociada con la radiación gamma y la radiación X es lo suficientemente alta como para romper enlaces atómicos y moleculares (es decir, ionizar átomos), produciendo cambios en la materia, incluyendo las células vivas. Por tanto, este extremo del espectro de alta energía se denomina "radiación ionizante".

A.2 Dosis absorbida y RBE

La cantidad de energía de radiación en un medio se expresa como dosis absorbida. La unidad de dosis absorbida (a veces referida simplemente como "dosis") es gray (Gy), donde

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

Por lo tanto, la dosis absorbida es la medida de la energía de radiación absorbida por unidad de masa. La unidad usada al principio fue el "rad", donde $100 \text{ rads} = 1 \text{ Gy}$.

Es posible que la misma dosis absorbida de diferentes tipos de radiación no produzca efectos biológicos similares. Por ejemplo, 1 Gy de radiación-X tendría menos efectos biológicos que un 1 Gy de neutrones o protones. La característica clave que crea esta diferencia es la distribución de la deposición de energía por estos diferentes tipos de radiación en el medio expuesto (tales como los tejidos). Esta característica se puede describir mediante transferencia de energía lineal (LET) (ver descripción a continuación).

Cuando comparamos la efectividad biológica de los diferentes tipos de radiación, tradicionalmente la radiación X (250 keV) es usada como el estándar contra la cual son comparados otros tipos de radiaciones. La efectividad biológica relativa (RBE, por sus siglas en inglés) de una radiación de prueba (r) puede definirse como:

$$\text{RBE (r)} = D_{250} / D_r$$

Donde, D_{250} y D_r son las dosis de radiación X (de 250 keV) y la radiación de prueba, respectivamente, requerida para el mismo efecto biológico.

La RBE puede ser diferente dependiendo de los tejidos / células bajo consideración, y también del efecto biológico seleccionado para esta comparación.

A.3 Transferencia de energía lineal (LET)

La transferencia de energía lineal (LET) representa la cantidad de energía transferida de la radiación a un medio (por ejemplo, tejido) por unidad de longitud del camino recorrido por la radiación (a veces conocida como "pista"). La unidad comúnmente utilizada es keV/ μm . LET se define como:

La transferencia de energía lineal (LET) de un medio por partículas cargadas es el cociente de dE/dl , donde dE es la energía perdida por una partícula cargada debido a colisiones electrónicas al atravesar una distancia dl .

Dado que la transferencia de energía al medio se realiza principalmente a través de la ionización, la LET está relacionada con la densidad de ionización a lo largo de la pista. LET da una indicación de la "calidad de la radiación".

Note que LET está relacionado con la energía perdida por partículas cargadas. Por lo tanto, para radiación X y radiación gamma, la energía de interés es la energía perdida por electrones secundarios generados por estos fotones.

Los valores típicos de LET para los tipos de radiación que son comúnmente usados por la industria o medicina se enlistan en la tabla siguiente.

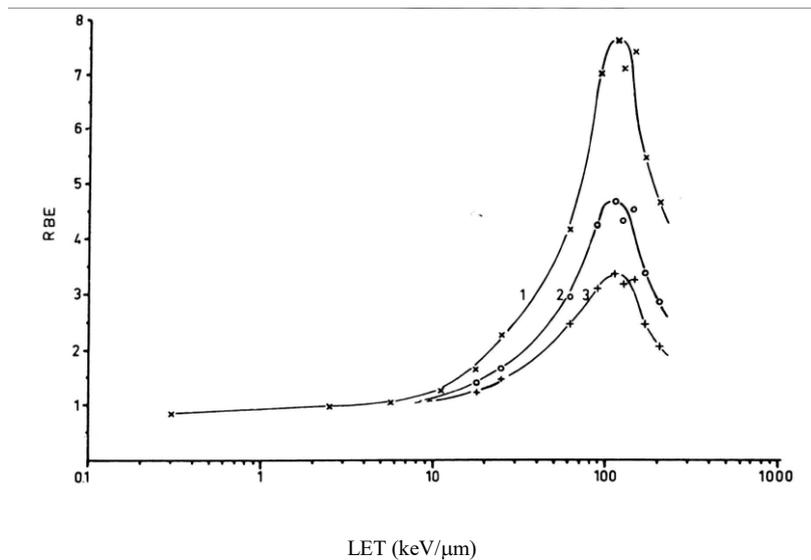
**VALORES DE TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGÍA (LET) PARA
DIFERENTES TIPOS DE RADIACIÓN**

Tipo de radiación	LET (keV/μm)
Radiación gamma Cobalto-60	0.2
Radiación-X 250 keV	2.0
Protones de 10 MeV	4.7
Partículas α 2.5 MeV	166

Un valor pequeño de LET significa que hay pocos eventos de ionización a lo largo del camino de la radiación. Por lo tanto, la radiación X, la radiación gamma y los electrones rápidos se consideran radiación poco ionizante, a diferencia de los neutrones, protones y partículas α.

La figura siguiente muestra la relación entre RBE y LET; esta muestra tres curvas para los tres diferentes efectos biológicos. Como se mencionó anteriormente, la RBE depende del efecto biológico que está siendo considerado. A partir de esto, queda claro que la RBE para la radiación gamma de cobalto-60 (que sería similar para la radiación gamma de Cesio-137) es solo ligeramente menor que la de la radiación X de 250 keV.

Todas las curvas en la figura muestran un RBE máximo alrededor de LET de aproximadamente 100 keV/μm. El espaciamiento promedio entre los eventos de ionización para este valor LET coincide aproximadamente con el diámetro de la doble hélice del ADN, lo que maximiza el efecto de la radiación. La radiación con un LET más alto tiene eventos de ionización más densamente ubicados de lo necesario para el efecto biológico y, por lo tanto, la energía se "desperdicia". Esto se manifiesta como una disminución de la RBE después de este valor óptimo de LET



Dependencia de la RBE sobre LET para supervivencia de células de mamíferos de origen humano. Las Curvas 1, 2 y 3 refieren a niveles de supervivencia de células de 0.8, 0.1 y 0.01, respectivamente. Esto ilustra que el valor de RBE depende del efecto biológico seleccionado para la comparación. [6] (de [19])

APÉNDICE B

Dosis para pupas

El siguiente procedimiento describe como dar la misma dosis a pupas 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 (MeV cm²/g), el cual está en función de la energía.

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

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

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

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.

Deberíamos 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 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. Ésto únicamente puede ser determinado por experimentos biológicos/entomológicos.

PODER DE FRENADO DE COLISIONES MASIVAS 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

APÉNDICE C

Propiedades del ‘arroz instantáneo’

C.1 Requerimientos para la selección de un producto simulado

Para propósitos de dosimetría es esencial que seleccionemos un material que pueda “simular” a los insectos tan cerca como sea posible. Para ser realista, el material / producto simulado debe tener propiedades de atenuación y dispersión de la radiación (es decir, el coeficiente de absorción de energía de la masa de fotones) similares a la de los insectos, al menos en el rango de energía de interés (30-150 keV). Generalmente, esto se puede lograr teniendo una densidad y composición elemental similar. Varios materiales tales como los cereales y diferentes tipos de arroz fueron investigados para simular la pupa de los insectos. Finalmente, se seleccionó una marca particular de "arroz instantáneo" para este propósito. Sus propiedades se dan aquí.

C.2 Densidad

La densidad de la pupa es aproximadamente 0.46 g/cm³.

La densidad medida de este particular arroz instantáneo que fue utilizado para todos los experimentos de dosimetría fue de 0.44 g/cm³. Sin embargo, notamos que con el tiempo la densidad cambió debido a la evaporación del agua. Este arroz fue comprado en los EE.UU. la densidad del “minut rice” comprado en la comisaria de las UN en Viena es de 0.4 g/cm³.

C.3 Composición elemental

Se analizaron muestras de arroz instantáneo y pupas de tsé-tsé sobre una base contractual, por el Laboratorio de Microanálisis, del Departamento de Química, de la Universidad de Viena. La tabla siguiente muestra los resultados del reporte 0408/0316.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DEL ‘ARROZ INSTANTÁNEO’ Y PUPA DE TSE TSE

Elemento	Arroz Instantáneo	Pupa de Tse tse
C	40.98 ±0.28	22.86 ±0.3
H	6.46 ±0.05	10.05 ±0.1
N	1.44 ±0.17	3.76 ±0.1
S	0.086 ±0.01	0.170 ±0.03
O	50.54 ±0.06	63.09 ±0.2
Cl	0.033 ±0.003	0.148 ±0.01
Otros (cenizas residuales)	0.163 ±0.03	0.854 ±0.03
SUM	99.62 ±0.5	100.78 ±0.5

C.4 Coeficiente de absorción de energía de masa de fotones

El coeficiente de absorción de energía de masa de fotones para pupas y arroz puede ser calculado a partir de los datos anteriores y de los valores de este coeficiente para varios elementos, es decir C, H, N y O [5]. Para estos cálculos, el S y el Cl fueron omitidos.

Los resultados son mostrados en las figuras de abajo para este coeficiente para pupas y arroz en función de la energía de los fotones. También se incluye el coeficiente para el agua a modo de comparación [5].

APÉNDICE D

La cámara de ionización en el Laboratorio de Control de Plagas de Insectos

Una cámara de ionización de aire libre tipo Farmer 0.18-cm³ (suministrado por RadCal Corporation, Monrovia, CA, USA) en conjunto con un electrómetro fue utilizado como un sistema de dosimetría estándar de referencia para medir la tasa de dosis y la dosis (para establecer la relación dosis-energía) en un punto de referencia. Este fue calibrado por el proveedor en un rango de fotón de energía de 50-1300 keV con trazabilidad a un NIST, con la incertidumbre citada en el factor de calibración del 5% en este rango⁷. Este valor también se verificó en el Laboratorio de Estándares Primarios de Austria. (BEV), Seibersdorf comparándolo con su cámara de ionización estándar de referencia. Dado que tales calibraciones se realizan en un campo de fotones no dispersos (que inciden normalmente en la cámara de ionización), también se confirmó que no hubo variación significativa en la respuesta de la cámara de ionización hasta un ángulo de incidencia de aproximadamente 30 ° con respecto a la normal.

Una cámara de ionización mide el kerma del aire o la tasa de kerma del aire. Sin embargo, como necesitamos la dosis para el agua (Gy) o la tasa de dosis para el agua (Gy/min) y no para el kerma del aire. La dosis (en el aire) está relacionada con el kerma (en el aire) de la siguiente manera:

$D_{\text{air}} = K_{\text{air}} (1-g)$, donde g es la fracción de energía convertida en energía de frenado (bremsstrahlung).

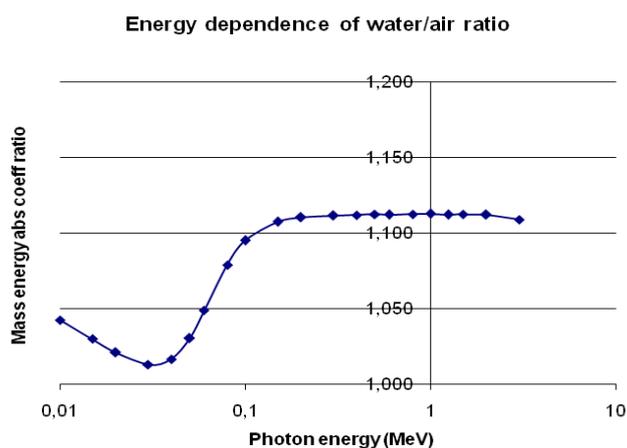
Sin embargo, en la energía del fotón que nos interesa aquí, y para materiales de bajo número atómico, g es insignificante. Por lo tanto, $D_{\text{air}} = K_{\text{air}}$.

Ahora, D_{water} puede ser calculado a partir de D_{air} de la forma siguiente:

$$D_{\text{water}} = D_{\text{air}} \times \text{coeficiente de absorción de energía de masa de fotones}$$

Donde, esta relación = $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}} / (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}$.

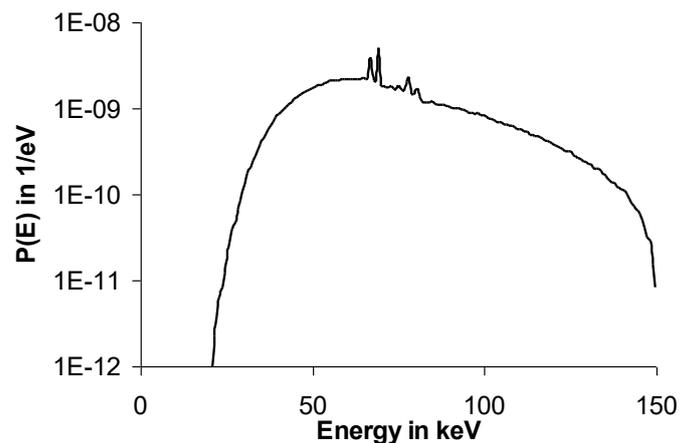
Esta relación debe calcularse para la energía fotónica efectiva en la ubicación de las mediciones de la cámara de ionización. Su variación con la energía de los fotones se muestra en la siguiente figura.



Dependencia de la relación del coeficiente de absorción de energía de masa de fotones para agua-aire con energía fotónica [5]

⁷ El valor del 5% es para 2 desviaciones estándares. Por lo tanto, la incertidumbre estándar es 2.5%, la cual debe ser designada como u_{ref} .

La posición de referencia seleccionada fue el centro del contenedor, con todos los recipientes llenos con arroz instantáneo para simular las condiciones de irradiación normalmente utilizadas. La tasa de dosis (y la dosis) medida por la cámara de ionización fue convertida en tasa de dosis (y dosis) para el agua multiplicándolo por un factor de 1.05, que es la relación entre los coeficientes de absorción de masa de fotones de agua y aire ponderados para el espectro de fotones en esta ubicación. La siguiente figura muestra el espectro del fotón en esta ubicación determinado por simulación de Monte Carlo, utilizando el código Penélope de R. Uribe (comunicación personal).



Espectro del fotón al centro del contenedor para 150 keV determinado por Simulación MC (todos los recipientes llenos con arroz instantáneo) (comunicación personal, R. Uribe).

Antes de iniciar las mediciones con la cámara de ionización, se verificó la linealidad de su respuesta para asegurarse de que funcionaba por debajo del nivel de saturación. Esto se hizo mediante las determinaciones de la tasa de dosis en el centro del recipiente a medida que aumentaba la corriente del tubo, mientras se mantenía constante el voltaje del tubo a 150 kV. Si no existe saturación, la tasa de dosis debe aumentar linealmente con el amperaje del tubo. Cualquier flexión de la curva a una corriente más alta sugeriría saturación. Los datos mostraron que la cámara de ionización está dentro de su rango lineal cuando se opera en estas condiciones y por debajo de la corriente del tubo de 45 mA (el máximo posible en este momento).

Una cámara de ionización mide la dosis o la tasa de dosis en el aire de la cavidad. Al ser una cámara de aire libre, el valor medido debe corregirse por la temperatura y la presión del aire de la cavidad durante las mediciones. Esto se hace convenientemente de forma automática cuando el electrómetro se opera en el modo de "compensación". La temperatura es monitoreada en la cámara de ionización y la presión en el digitalizador.

El electrómetro asociado con la cámara de ionización puede ser operado en dos modos: mide la tasa de dosis en aire (Gy/min) o la dosis integrada en aire (Gy). Ambos modos fueron muy útiles en la caracterización del irradiador y el sistema de dosimetría Gafchromic.

APÉNDICE E

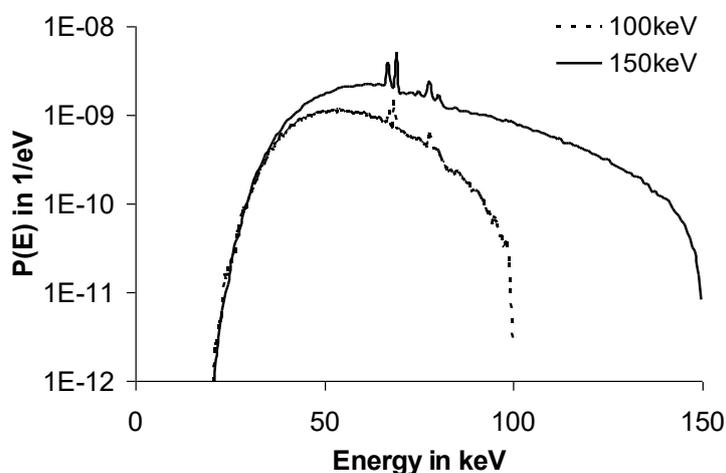
Parámetros que afectan la respuesta del dosímetro de película Gafchromic para radiación X de baja energía

E.1 General

Es bien sabido que la temperatura de la irradiación afecta la respuesta de los dosímetros Gafchromic [2]; sin embargo, por las dosis bajas que nos conciernen la temperatura no sube mucho (menos de 1°C), y generalmente la temperatura de calibración y de rutina son muy similares. No obstante, se llevaron a cabo varios experimentos para estudiar el efecto de otras cantidades de influencia sobre el rendimiento del dosímetro, es decir, la energía del fotón y el material en contacto con la película del dosímetro.

E.2 Energía del fotón

Para cambiar el espectro del fotón de energía en el centro del recipiente (en la ubicación del dosímetro), el tubo fue operado a 100 y 150 keV (la siguiente figura muestra los dos espectros de energía fotónica calculados por computadora determinados por R. Uribe). La tasa de dosis (o dosis) fue medida con la cámara de ionización también con el sistema dosimétrico Gafchromic (calibrado para un espectro de 150 keV). Cuando se expuso al mismo campo (basados sobre las mediciones de la cámara de ionización), las dosis medidas por los dos juegos de dosímetros Gafchromic difieren por menos de 3%, comparable con la incertidumbre del sistema dosimétrico Gafchromic tan bien con el sistema de cámara de ionización. Por lo tanto, se puede concluir que la respuesta de la película. Por lo tanto, se puede concluir que la respuesta de la película Gafchromic es independiente de la energía en este rango de energía de fotones.



Espectro de energía de fotones para radiación X de 100 y 150 keV en el centro del recipiente lleno de arroz instantáneo determinado por simulaciones MC (comunicación personal, R. Uribe).

E.3 Material que rodea el dosímetro

En otro conjunto de experimentos, la película de Gafchromic (cuadrada de 2x2 cm) fue insertada entre diferentes materiales y colocada en el centro del recipiente. La película insertada estaba completamente rodeada y en contacto con arroz instantáneo. La siguiente tabla muestra los valores netos de DO en estos diferentes materiales para una misma dosis.

DEPENDENCIA DE LA RESPUESTA DEL DOSÍMETRO DE PELÍCULA GAFCHROMIC SOBRE EL MATERIAL CIRCULANTE

Material	Respuesta del dosímetro (DO, neta)	Respuesta normalizada
Película dosimétrica desnuda	$0.332 \pm 1.3\%$	1.0
Sobre negro PE ^a	$0.341 \pm 0.3\%$	1.03
FWT sobre de papel ^{b c}	$0.393 \pm 0.6\%$; $0.379 \pm 1.2\%$	1.18 – 1.14
Papel de Impresión	$0.416 \pm 0.7\%$	1.25
3-mm PVC	$0.608 \pm 0.6\%$	1.83
2-mm PVC	$0.619 \pm 0.6\%$	1.86
1-mm PVC	$0.672 \pm 0.7\%$	2.02

^a ~ 100 μm; ^b ~ 150 μm; ^d ~ 110 μm

^c FWT sobres de papel suministrados por Far West Technologies, Inc., California, USA.

Esto muestra claramente que la respuesta de la película dosimétrica Gafchromic depende significativamente del material en contacto. Por lo tanto, para medir las dosis, los dosímetros siempre deben ser usados de la misma forma que fue realizada la calibración. Se recomienda usar el sobre de papel de 1x1- pulgada de FWT, durante la calibración del sistema dosimétrico también durante las mediciones de la dosis.

Sin embargo, esto solo es válido cuando se necesita el valor absoluto de la dosis. En el caso de valores relativos, como medir la uniformidad de la dosis, esto no es necesario; se puede utilizar cualquier material conveniente. Por ejemplo, todas las mediciones de distribución de dosis radiales y axiales fueron realizadas utilizando tiras largas de películas dosimétricas (de 1 cm de ancho), insertadas entre placas de PVC o PMMA.

E.4 Dosímetros múltiples

Frecuentemente se requiere irradiar más de un dosímetro en una ubicación en particular (generalmente para mejorar la precisión de la medición). Entonces, la pregunta es: refiriéndose al efecto del material circundante mencionado anteriormente, ¿se pueden colocar varios dosímetros juntos sin que se afecten entre sí?

Cuando se irradiaron tres dosímetros juntos en un sobre de FWT, quedó muy claro que se afectaban entre sí. Por lo tanto, SÓLO se puede colocar una película dosimétrica en un sobre; es decir, las películas no deben estar en contacto entre sí.

Se llevó a cabo otro experimento en el que se utilizaron nueve sobres, cada uno de los cuales contenía solo una película dosimétrica (2x2 cm). Todos estos se colocaron juntos en el centro de un recipiente y se expusieron usando los siguientes parámetros: 150 kV, 35 mA, 5 rpm, 600 s. Después de la irradiación, cada película de 2x2 cm se cortó en cuatro dosímetros de 1x1 cm y se midió la DO. Los valores de estos nueve juegos de dosímetros se enumeran en la siguiente tabla.

RESPUESTA DE NUEVE PELÍCULAS COLOCADAS JUNTAS, CADA UNA EN SU PROPIO SOBRE.

Film ID	OD, net
1	0.506 ±1.1%
2	0.479 ±0.6%
3	0.508 ±0.1%
4	0.504 ±1.3%
5	0.505 ±0.7%
6	0.508 ±1.3%
7	0.509 ±1.0%
8	0.504 ±1.0%
9	0.504 ±0.7%

- promedio de 9 películas = $0.503 \pm 1.8\%$

- promedio de 8 películas = $0.506 \pm 0.4\%$ (ignorando la 2a. película)

Asumiendo que la 2ª. Película estaba defectuosa, es muy claro que los otros 8 dosímetros están leyendo la misma dosis. Por tanto, se pueden colocar juntos varios de estos sobres.

E.5 Orientación del dosímetro

El dosímetro de película Gafchromic es un dosímetro bidimensional, siendo una película delgada. La pregunta es: ¿el valor medido de la dosis depende de la orientación de la película con respecto a la dirección del haz primario?

Se llevó a cabo el siguiente experimento:

- Parámetros del irradiador: 150 kV, 35 mA, sin rotación, 390 s
- Dos películas dosimétricas (2x2 cm) (en dos sobres FWT separados) fueron colocados en el centro de un contenedor; uno de forma plana de cara al tubo de rayos-X y otro de cara al borde del tubo (y perpendicular a los lados del recipiente). Los resultados fueron:

Valores de respuesta (DO neta): dosímetro plano – $0.243 \pm 0.9\%$

Dosímetro del borde – $0.239 \pm 6.3\%$

Esto indica que ambos juegos de dosímetros leen casi la misma dosis, independientemente de la orientación. Tenga en cuenta que hay un gradiente de dosis en la dirección de los dosímetros de borde y, por lo tanto, una gran variación en la dosis. Por supuesto, este experimento se hizo en el centro del contenedor, el cual está lejos de la fuente de radiación (tubo de rayos-X). Si se llevara a cabo un experimento similar cerca del tubo, los dos valores serían diferentes. Sin embargo, en una situación de la vida real, los recipientes giran y los dosímetros pasarán por diferentes orientaciones y diferentes distancias, dependiendo de dónde se coloquen los dosímetros.