



MX0100277

## ***Evolución, Estado Actual y Futuro de las Películas de Tinte Radiocrómico***

**J. E. Villarreal-Barajas**

*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares  
Facultad de Medicina I.A.E.M*

### **Resumen**

*La evolución de las películas radiocrómicas, su estado actual y su futuro desarrollo son el objeto del presente trabajo. Para este propósito se realizó una revisión de la evolución y el estado actual del uso de las películas de tinte radiocrómico como herramientas para la determinación de distribuciones de dosis absorbidas producidas por fuentes emisoras beta, beta-gamma, electrones y rayos X. En particular se presenta el desarrollo de las películas radiocrómicas tipo GafChromic<sup>(MR)</sup> que por su calidad en términos de reproducibilidad, sensibilidad y alta resolución espacial se han convertido en las películas de mayor uso dominando el mercado. En virtud de que uno de los campos de aplicación más importante de este tipo de películas es la dosimetría clínica, se presentan las aplicaciones más relevantes en esta área, en la cual, la dosimetría de alta resolución utilizando GafChromic<sup>(MR)</sup> se ha convertido en una herramienta básica. Por otra parte se discuten los alcances de este tipo de dosimetría y las posibles líneas de desarrollo de la dosimetría con películas de tinte radiocrómico.*

### **Antecedentes**

Desde los años 60 el interés por el uso de películas radiográficas y de tinte radiocrómico como dosímetros para rayos X y electrones ha ido en constante aumento (McLaughlin et al. 1960, McLaughlin 1966). Esto se ha debido principalmente a la necesidad de realizar mapeos de distribuciones de dosis absorbida cada vez con una mayor resolución espacial y con una respuesta más amplia en términos de la dosis absorbida. Por otra parte el uso de estas películas se ha visto favorecido por la necesidad de estimar la dosis absorbida en situaciones donde las dimensiones (espesores) de los dosímetros son críticas para la exactitud de las mediciones (por ejemplo en dosimetría de piel emisores beta, dosimetría de interfaces, etc.). Dicho en otra forma las películas radiográficas y de tinte radiocrómico poseen espesores pequeños (comparados con el alcance de las partículas generadas por la radiación primaria a estudiar) de manera que no perturban significativamente el campo de radiación representando cavidades cuasi perfectas que desde el punto de vista dosimétrico facilitan la estimación de la dosis absorbida (McLaughlin et al. 1977). En virtud de que la composición

de las películas de tinte radiocrómico es muy parecida al tejido humano estas han sido preferidas sobre las películas radiográficas para su aplicación en dosimetría clínica (Muench et al. 1991). Durante los años 70 McLaughlin y su grupo del National Institute of Standard and Technology (NIST) desarrollaron dosímetros delgados (30-60 micras) de tinte radiocrómico que podían ser utilizados como cavidades cuasi perfectas (metrologicamente hablando) para electrones de algunos cientos de keV hasta 10 MeV (McLaughlin 1974). Una de las aplicaciones más exitosas de estos dosímetros fue la del control de calidad de la dosis absorbida en alimentos irradiados para su esterilización con gammas de Co-60 o electrones de varios MeV (McLaughlin et al. 1975). A finales de los años 70 Humphreys et al. (1977) realizaron medidas de distribuciones de dosis en profundidad en diferentes medios (carbón, aluminio, poliestireno y músculo de res) utilizando películas delgadas de tinte radiocrómico, los resultados experimentales fueron comparados con predicciones basadas en cálculos usando el método de Monte Carlo para transporte de electrones encontrándose un buen acuerdo con diferencias típicamente menores al 10 %. Para finales de los años 80 una película de tinte radiocrómico conocida comercialmente como GafChromic<sup>(MR)</sup> (producida por GAF Chemicals Corporation) se estaba apoderando del mercado de este tipo de películas gracias a su calidad en términos de reproducibilidad, sensibilidad a radiación ionizante y relativamente baja respuesta (cambio en su densidad óptica) con la exposición a la luz visible (Saylor et al. 1988). A principios de los años 90 aparecen dos publicaciones que habrían de ser la punta de lanza de las aplicaciones de GafChromic<sup>(MR)</sup> en dosimetría clínica (Chu et al. 1990, McLaughlin et al. 1990). En estas publicaciones se presentaban resultados muy completos de la respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> mostrando el potencial de esta película radiocrómica como herramienta para el mapeo de distribuciones de dosis absorbida con alta resolución espacial. En virtud de que GafChromic<sup>(MR)</sup> en sus diferentes versiones ha mostrado ser la película radiocrómica con mayor uso y desarrollo desde su introducción, este trabajo se abocara a la revisión de la evolución del uso de esta película radiocrómica en el ámbito de la dosimetría de haces de electrones y fotones.

### **Características dosimétricas de GafChromic<sup>(MR)</sup>**

La primera versión de GafChromic<sup>(MR)</sup> que estuvo disponible comercialmente en forma masiva fue la denominada GafChromic<sup>(MR)</sup> DM-1260 (Muench et al. 1991). Esta película venía en una presentación tipo rollo de dimensiones 13 cm x 15 m. Mas tarde esta misma película se vendería en formato de hojas de 8 x 10 pulgadas, este formato todavía se encuentra en el mercado y se le conoce como GafChromic<sup>(MR)</sup> modelo HD-810 (Villarreal-Barajas et al. 1999a). Estos dos modelos de GafChromic<sup>(MR)</sup> están compuestos de una emulsión sensible de aproximadamente 6 µm de espesor en una base de políester de 100 µm. La película no irradiada es transparente a la luz visible y al ser irradiada su color cambia a tonos de azul siendo estos mas intensos en función de la dosis absorbida en la emulsión sensible. El espectro de absorción de GafChromic<sup>(MR)</sup> irradiado (ver figura 1) muestra dos picos bien definidos, uno a aproximadamente 610 nm y el mas pronunciado a 670 nm.

De los primeros estudios completos que se realizaron sobre las propiedades dosimétricas de GafChromic<sup>(MR)</sup>, el trabajo de Chu et al. (1990) reviso solamente la respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> a la radiación gamma del <sup>60</sup>Co, McLaughlin et al. (1990) ampliaron el estudio explorando la respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> a electrones de 10 MeV. En estos dos estudios se presentaron resultados de la respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> a diferentes longitudes de onda de lectura, estabilidad después de irradiación, efecto de la temperatura durante irradiación y dependencia de la respuesta con la humedad. Estos resultados se muestran resumidos en la tabla 1.

**Tabla 1**  
**Respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> DM-1260 y HD-810 a parámetros de irradiación y lectura (Chu et al. 1990, McLaughlin et al 1990, Zhongying et al. 1995).**

**Respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> DM1260 o HD810**

<b>Longitud de onda de lectura</b>	<b>Intervalo de trabajo (kGy)</b>	
$\lambda = 400 \text{ nm}$	0.01 - 25	Todas las irradiaciones fueron realizadas con gammas de $^{60}\text{Co}$ y las D.A. reportadas son en agua
$\lambda = 510 \text{ nm}$	0.01 - 2.0	
$\lambda = 580 \text{ nm}$	0.01 - 1.0	
$\lambda = 600 \text{ nm}$	0.05 - 0.6	
$\lambda = 650 \text{ nm}$	0.05 - 0.2	
<b>Cambio en la densidad óptica (<math>\Delta\text{D.O.}</math>) después de irradiación</b>	$\lambda = 400 \text{ nm}$	
24 horas	$\Delta\text{D.O.}$ de 16%	D.A. de 2kGy
14 días	$\Delta\text{D.O.}$ de 18%	
100 días	$\Delta\text{D.O.}$ de 20%	
<b><math>\Delta\text{D.O}</math> con la temperatura de irradiación (referencia a 20°C)</b>	$\lambda = 400 \text{ nm}$ $\lambda = 600 \text{ nm}$	
-20 °C	$\Delta\text{D.O.}$ -9%	Las mediciones a 400 nm fueron realizadas a una D.A. de 5 kGy y las correspondientes a 600 nm a 1kGy
-10 °C	$\Delta\text{D.O.}$ -6%	
0 °C	$\Delta\text{D.O.}$ -4%	
+10 °C	$\Delta\text{D.O.}$ -3%	
+30 °C	$\Delta\text{D.O.}$ +2% $\Delta\text{D.O.}$ +8%	
+40 °C	$\Delta\text{D.O.}$ +3% $\Delta\text{D.O.}$ +11%	
+50 °C	$\Delta\text{D.O.}$ -2% $\Delta\text{D.O.}$ +11%	
+60 °C	$\Delta\text{D.O.}$ +2%	
<b>Cambio en D.O con la humedad (referencia 35 %)</b>	$\lambda = 400 \text{ nm}$	
50%	$\Delta\text{D.O.}$ -3%	Mediciones a D.A. de 5kGy
70%	$\Delta\text{D.O.}$ -7%	
90%	$\Delta\text{D.O.}$ -12%	

Es claro por los resultados mostrados en la Tabla 1 que el intervalo de trabajo de GafChromic<sup>(MR)</sup> esta determinado por la longitud de onda del equipo lector utilizado, variando significativamente desde una dosis umbral de entre 5 y 10 Gy hasta su saturación a 25 kGy. Dado que en aplicaciones clínicas el intervalo de dosis de interés se extiende de 1 a 100 Gy, el uso de un densitómetro o espectrofotómetro centrado alrededor del pico de absorción de 670 nm sería la mejor opción para esta aplicación en particular. Si en cambio se desea estimar dosis absorbidas mayores a 20 kGy, la longitud de onda de lectura a utilizar sería la de 400 nm. En relación al cambio en la densidad óptica (D.O.) con el tiempo transcurrido después de la irradiación se observa un aumento significativo de esta en las primeras 24 horas,

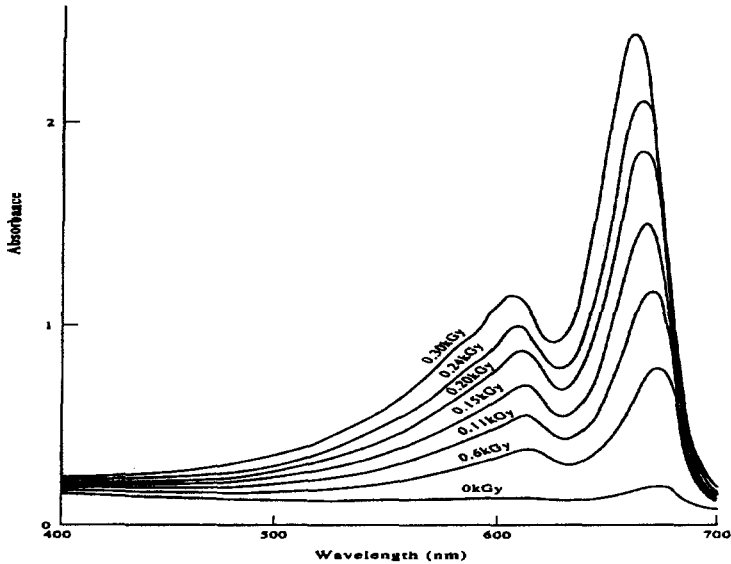


Figura 1. Comparación de espectros de absorción en GafChromic<sup>(MR)</sup> para dosis absorbida (en agua) de 0 a 0.30 kGy (Zhongying et al. 1995).

después de las cuales la D.O. prácticamente permanece constante, de este comportamiento es que se deriva la recomendación de que las películas una vez irradiadas sean leídas al menos 24 horas después de terminada su irradiación. Con relación a la sensibilidad de GafChromic<sup>(MR)</sup> a la temperatura de irradiación y la humedad, los efectos en la respuesta de la película son competitivos, así mientras existe un claro incremento en la D.O. con la temperatura (acentuada si se trabaja a longitudes de onda cercana a los picos de absorción) se observa una reducción de la respuesta al incrementar la humedad durante la irradiación. Es importante hacer notar que en el caso de la temperatura existe un efecto de "ruptura" a temperaturas mayores a 40°C, esta ruptura esta caracterizada por una reducción en la respuesta (incremento en D.O. con respecto a 20°C) contraria al incremento observado a temperaturas entre los 20°C y los 40°C.

En lo relativo a la resolución espacial McLaughlin et al. (1990) determinaron que esta es de al menos 1000 líneas/mm. Esta significativamente alta resolución espacial es atribuida al tamaño sub-microscópico de los cristales que componen la emulsión sensible. La respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> en términos de incremento en D.O. ( $\Delta$ D.O.) por unidad de dosis absorbida utilizando gammas del <sup>60</sup>Co ha mostrado ser la misma (+/- 5%) que la observada para electrones de 10 MeV (McLaughlin et al. 1990), partículas beta de <sup>90</sup>Y (Soares et al. 1993) y rayos X de 400 keV (ver figura 2a).

La homogeneidad entre diferentes lotes de GafChromic<sup>(MR)</sup> DM-1260 y HD-810 en términos de su respuesta a gammas del <sup>60</sup>Co relativa a dosis absorbida en agua en el intervalo de 0-1000 Gy es mostrada en la figura 2b. Estos resultados muestran la excelente consistencia entre 5 lotes diferentes de película formato HD-810 y uno de formato HD-1260, las películas fueron leídas con un microdensitómetro (Joyce Lobel MDM6) equipado con una fuente

luminosa de tungsteno-halogeno de 50W. Otro parámetro importante es el "envejecimiento" de la película con su potencial perdida de sensibilidad, Chu et al. (1990) no encontraron ningún cambio significativo en películas estudiadas a lo largo de un año (leídas a  $\lambda = 400$  nm), sin embargo el que escribe observo una reducción en la respuesta (reducción de la sensibilidad) de aproximadamente 7% (Villarreal-Barajas et al. 1999c) en un termino de un año (leídas con el microdensitómetro MDM6). Esta aparente diferencia entre los resultados de Chu et al. y el que escribe puede deberse a las diferentes longitudes de onda utilizadas para realizar las lecturas de la D.O..

### Aplicaciones de GafChromic<sup>(MR)</sup>

Las primeras aplicaciones de GafChromic<sup>(MR)</sup> como herramienta para el mapeo de distribuciones de dosis absorbida con alta resolución espacial se presentan en el área de la caracterización de fuentes de braquiterapia y aplicadores oftálmicos (Sayeg and Gregory 1991, Cheung et al. 1997). Por otra parte, la dosimetría de partículas calientes (partículas radioactivas con dimensiones típicamente de centenas de micras) presentaba una de las aplicaciones mas demandantes en términos de resolución espacial y variación de la rapidez de dosis absorbida, en esta línea se publican resultados sobre estudios de dosimetría de partículas calientes de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  (Darley et al. 1991),  $^{60}\text{Co}$  (Soares et al. 1991 y 1993, Villarreal-Barajas et al. 1997 y 1999a)) y  $^{170}\text{Tm}$  (Darley et al. 1994). Los resultados de la

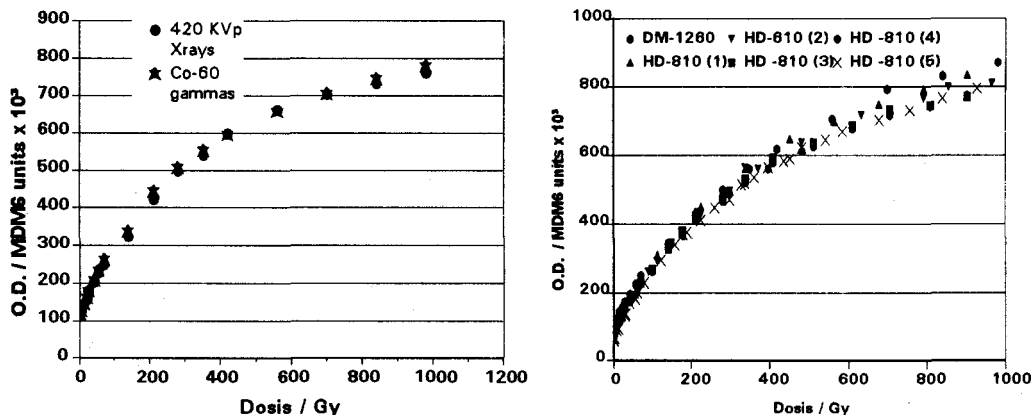


Figura 2 (a) Comparación de la respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> DM-1260 a gammas del  $^{60}\text{Co}$  y rayos X de 400 keV (Villarreal-Barajas et al. 1999b) (b) Respuesta de 5 lotes de GafChromic<sup>(MR)</sup> HD-810 y uno de GafChromic<sup>(MR)</sup> DM-1260 a dosis absorbidas en agua de 0 a 1000 Gy (Villarreal-Barajas 1999c).

dosimetría con GafChromic<sup>(MR)</sup> y con mediciones usando una cámara de extrapolación mostraban buen acuerdo para los tres radioisótopos estudiados. Otra área en la que la alta resolución espacial de GafChromic<sup>(MR)</sup> encontraría un terreno fértil para su aplicación fue la caracterización dosimétrica de haces de radiación utilizados en cirugía estereotáxica. En esta línea de aplicación Ramani et al. (1994) reconocían la utilidad de GafChromic<sup>(MR)</sup> como herramienta para el control de calidad en radiocirugía para haces de rayos X de 6 MeV. Por otra parte, McLaughlin et al. (1994) reportaban el excelente acuerdo entre mediciones de

los perfiles de dosis absorbida en agua entre GafChromic<sup>(MR)</sup> y los sistemas de planeación (KULA<sup>(MR)</sup>) asociados con el "Gamma Knife", sin embargo se reconocía que la relativamente baja sensibilidad de GafChromic<sup>(MR)</sup> en sus versiones DM-1260 y HD-810 era una limitante importante para su aplicación rutinaria en dosimetría clínica. Para finales de 1994 ya se encontraba en el mercado otra película radiocrómica que dada su mayor sensibilidad (aproximadamente 2 veces mayor que la correspondiente al tipo HD-810 medida a la misma longitud de onda) e idéntica resolución espacial a la observada en las películas tipo DM-1260 y HD-810, habría de ir substituyendo a estas últimas. La nueva película era producida por la misma compañía que GafChromic<sup>(MR)</sup> tipo DM-1260 y HD-810 y se le conocería como GafChromic<sup>(MR)</sup>MD-55 (Meigooni et al. 1996). Esta nueva película fue rápidamente substituida por otra con una sensibilidad aproximadamente 2 veces mayor que MD-55 (por tanto unas 4 veces más sensible que DM-1260 y HD-810), a esta película se le conocería como NMD-55 (McLaughlin et al. 1996) o bien MD-55-2 (Reinstein et al. 1997a). Las propiedades de MD-55-2 en términos de su espectro de absorción, resolución espacial,  $\Delta D.O.$  después de su irradiación, variación de la D.O con la temperatura de irradiación, sensibilidad a la luz visible y dependencia energética para energías de fotones mayores a 100keV son muy similares a las observadas para GafChromic<sup>(MR)</sup> DM-1260 y HD-810 (McLaughlin et al 1994). Estas propiedades no son inesperadas si se considera que MD-55-2 esta compuesta por la misma emulsión sensible que HD-810 pero con un espesor aproximadamente 4 veces mayor (Klassen et al. 1997). La figura 3 muestra la respuesta de MD-55 y MD-55-2 (NMD-55) en términos de D.O. para una longitud de onda de lectura de 670 nm (pico de máxima absorción). El uso de MD55-2 como dosímetro de alta precisión requiere de gran cuidado en el procedimiento seguido para su irradiación y posterior evaluación, Klassen et al. (1997) ha mostrado que el solo hecho de rotar la película respecto a la dirección del haz de lectura, puede ocasionar cambio en la medida de la D.O de hasta 10%. Otro cuidado que deberá tenerse en la aplicación de GafChromic<sup>(MR)</sup> en cualquiera de sus versiones es la dependencia energética de su respuesta a energías de fotones o rayos X por debajo de los 100keV. McLaughlin et al. (1996) y Kron et al. (1998) observaron una respuesta de aproximadamente 60 % a energías de fotones por debajo de los 40 keV comparada con la respuesta al mismo valor de dosis absorbida en agua de fotones de 100 keV. Es importante notar que si las respuestas obtenidas por la película radiocrómica son corregidas por el cociente de los coeficientes másicos de energía absorbida ( $\mu_{en}/\rho$ ) del agua y GafChromic<sup>(MR)</sup> esta dependencia energética puede ser prácticamente eliminada. Por otra parte, los resultados de medidas absolutas de dosis absorbida en agua para una fuente plana de  $^{147}\text{Pm}$  ( $E_{\text{max}} = 0.22$  MeV) muestran un excelente acuerdo con medidas realizadas con GafChromic<sup>(MR)</sup> HD-810, indicando que para electrones (partículas beta) de energías bajas ( $^{147}\text{Pm}$   $E_{\text{avg}} = 0.062$  MeV) no se observa una dependencia energética (Villarreal-Barajas et al 1999b). Este resultado tampoco es inesperado si se toma en cuenta que los poderes de frenado másico son prácticamente idénticos para agua y GafChromic<sup>(MR)</sup> (McLaughlin et al 1991).

Para una revisión detallada de la dosimetría utilizando películas radiocrómicas se recomienda ampliamente consultar las recomendaciones del comité 55 de la AAPM (Niroomand-Rad et al. 1998). En virtud de la importancia de los equipos lectores en la evaluación de películas radiocrómicas se recomienda revisar las referencias (Stevens et al. 1996, Zhu et al. 1997, Reinstein and Gluckman 1997b, Kellerman and Gornik 1998, Reinstein et al. 1998, Dempsey et al. 1999).

En lo referente a las aplicaciones clínicas de GafChromic<sup>(MR)</sup> en radioterapia, en este trabajo mencionare solo aquellas que considero más relevantes. Para dosimetría de piel en haces de rayos X de 6 MeV Butson et al. (1996) obtuvieron resultados de la distribución de la dosis a

piel con una resolución espacial de 20 líneas /mm, utilizando una fuente de luz roja (610 - 700 nm) uniforme y una cámara CCD como equipo lector. Estos resultados de dosimetría en piel fueron ampliados por el mismo autor (Butson et al. 1998) para haces de rayos X de 6, 10 y 18 MeV utilizando un densitómetro a 670 nm. Otra aplicación en la que GafChromic<sup>(MR)</sup> por su elevada resolución se esta convirtiendo en una herramienta fundamental es la caracterización dosimétrica de aplicadores oftálmicos, en este sentido una de las ventajas que presenta el uso de GafChromic<sup>(MR)</sup> sobre otros dosímetros (además de su alta resolución espacial y espesor sensible) es la posibilidad de medir dosis absorbidas en superficies curvas, esto es particularmente importante dado que la geometría tanto de los aplicadores mismos como de las superficies oculares presentan curvaturas pronunciadas en las cuales se requiere realizar mediciones precisas de dosis absorbida Taccini et al. 1997). La investigación del uso de fuentes emisoras de partículas beta como <sup>32</sup>P para su potencial aplicación en radioterapia

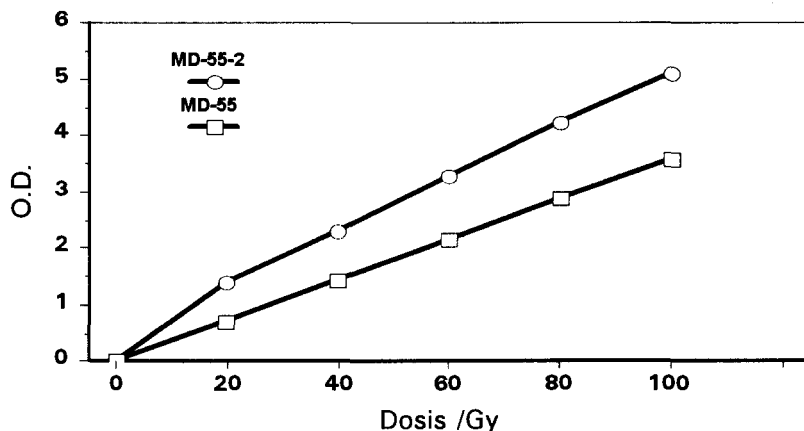


Figure 3. Respuesta de GafChromic<sup>(MR)</sup> MD-55-2 y MD-55 a dosis absorbida en agua utilizando una fuente de gammas de <sup>60</sup>Co. Todas las medidas de D.O. fueron realizadas a una longitud de onda de 670 nm (McLaughlin et al. 1996).

intravascular (Zhigang et al. 1997), la caracterización de "stents" para braquiterapia intracoronaria (Li et al. 1998) así como la caracterización dosimétrica de los nuevos dispositivos de rayos X para estereotaxia (Hakim et al. 1997) son las áreas que actualmente tiene la mayor actividad en cuanto a la aplicación de GafChromic<sup>(MR)</sup> como herramienta para el mapeo de distribuciones de dosis absorbida con alta resolución espacial.

#### 4. Conclusiones

Las películas de tinte radiocrómico son una herramienta muy poderosa para la evaluación de dosis absorbida en situaciones en donde la resolución espacial es determinante para una correcta caracterización dosimétrica de la fuente radiactiva o haz de radiación a estudiar. La tendencia en los últimos 10 años ha sido definitivamente orientada al mejoramiento de la calidad de las películas radiocrómicas en términos de reproducibilidad e incremento en su sensibilidad. En esta dirección, actualmente se encuentra en etapa de prueba una nueva película radiocrómica denominada GafChromic<sup>(MR)</sup> HS (High Sensitivity) que es aproximadamente 1.5 veces mas sensible que GafChromic<sup>(MR)</sup> MD-55-2 (Lewis 2000). Otro nuevo desarrollo (en etapa de prueba también) esta orientado a estimar las dosis a piel recibidas

por pacientes expuestos durante procedimientos guiados por fluoroscopia, esta película denominada GafChromic<sup>(MR)</sup> XR deberá estar disponible comercialmente el próximo año. Las primeras pruebas con GafChromic<sup>(MR)</sup> XR muestran un umbral de respuesta de 0.5 Gy, con saturación a aproximadamente 5 Gy. Para el futuro sería deseable contar con una película radiocrómica que además de su sensibilidad a la radiación ionizante fuera menos dependiente de las condiciones ambientales de irradiación, tales como la temperatura y la humedad. Por otra parte sería deseable contar con microdensitómetros de longitud de onda variable que pudieran explotar la ventaja de usar la longitud de onda mas adecuada para cada aplicación particular.

## Referencias

- Butson, M. Mathur, J. and Metcalfe, P. Radiochromic film as a radiotherapy surface-dose detector, *Phys. Med. Biol.* **41** 1073-1078 (1996).
- Butson, M. Yu, P. and Metcalfe, P. Measurement of off-axis and peripheral skin dose using radiochromic film, *Phys. Med. Biol.* **43** 2647-2650 (1998).
- Cheung Y, Yu P, Young E, Chan C, Ng M, Tang F, and Wong T. The electron-dose distribution surrounding an <sup>192</sup>Ir wire brachytherapy source investigated using EGS4 simulations and GafChromic<sup>TM</sup> film. *Appl. Radiat. Isot.* **48(7)** 985-900 (1997)
- Chu, R.D.H. Van Dyk, G. Lewis, D.F. O'Hara, K.P.J. Buckland, B.W. and Dinelle, F. Gafchromic Dosimetry Media, *Radiat. Phys. Chem.* **35** (1990).
- Darley, P.J. Charles, M.W. and Hart, C.D. Validation of theoretical models for calculating doses from hot particles. *Proceedings of the 17th IRPA Regional Congress, Portsmouth, 6-10 June 1994, pp153-156* (1994).
- Darley, P.J. Charles, M.W. Hart, C.D. Wells, J. and Coleby, M.S.E. Dosimetry of planar and punctiform beta sources using and automates extrapolation chamber and gafchromic dye films, *Radiat. Prot. Dosim.* **39** 61-66 (1991).
- Dempsey, J. Low, D. Kirov, A. and Williamson, J. Quantitative optical densitometry with scannin-laser film digitizers, *Med.Phys.* **26(8)** 1721-1731 (1999).
- Hakim, R. Zervas, N.T. Hakim, F. Butler, W.E. Beatty, J. Yanch, J. Biggs, P.J. Gall, K. and Sliski, A.P. Initial characterization of the dosimetry and radiobiology of a device for administering interstitial steretactic radiosurgery, *Neurosurgery* **40(3)** 510-517 (1997).
- Humphreys, J.C. and Jarrett, R.D. Measurements of dose distributions in various materials irradiated by 10-MeV electrons, *Radiat. Phys. Chem.* **9** 749-761 (1977).
- Kellerman, P. Ertl, A. and Gomik, E. A new method of readout in radiochromic film dosimetry, *Phys. Med. Biol.* **43** 2251-2263 (1998).
- Klassen, N.V. Van der Zwan, L. and Cygler, J. GafChromic MD-55: Investigated as a precision dosimeter, *Med.Phys.* **24** 1924-1934 (1997).
- Kron, T. Duggan, L. Smith, T. Rosenfeld, A. Butson, M. Kaplan, G. Howlett, S. and Hyodo, K. Dose response of various detectors to synchrotron radiation, *Phys. Med. Biol.* **43** 3235-3259 (1998).
- Lewis, D., Comunicación personal Julio 2000
- Li, A. Eigler, N. Litvack, F. and Whiting, J. Characterization of a positron emitting V48 nitinol stent for intracoronary brachytherapy, *Med.Phys.* **25(1)** 20-28 (1998).
- McLaughlin, W.L. Hjortenber, P.E. and Batsberg Pedersen, W. Low energy scanned electron-beam dose distributions in thin layers, *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes* **26** 95-106 (1975).



- McLaughlin, W.L. Megaroentgen Dosimetry Employing Photographic Film without Processing, *Radiat. Res.* **13** 594-609 (1960).
- McLaughlin, W.L. Microscopic Visualization of Dose Distributions, *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes* **17** 85-96 (1966).
- McLaughlin, W.L. "Radiation Dosimetry With Thin Films." In *1. Industrial Applications of small Accelerators ed.*, edited by Morgan, IL and Duggan, JL, 65-85. vol.II. Denton, TX: North Texas State University, 1974.
- McLaughlin, W.L. Miller, A. Fidan, S. and Pejtersen, K. Radiochromic Plastic Films for Accurate Measurement of Radiation Absorbed Dose and Dose Distribution, *Radiat. Phys. Chem.* **10** 119-127 (1977).
- McLaughlin, W.L. Yundong, C. Soares, C.G. Miller, A. Van Dyk, G. and Lewis, D.F. Sensitometry of the response of a new radiochromic film dosimeter to gamma radiation and electron beams, *Nucl. Instrum. Method. Phys.Res.* **A302** 165-176 (1991).
- McLaughlin, W. Soares, C., Sayeg, J., McCullough, E., Kine, R., Wu, A. and Maitz, H. The use of radiochromic detector for the determination of stereotactic radiosurgery dose characteristics, *Med.Phys.* **21**(3) 379-388 (1994).
- McLaughlin, W.L. Puhl, J.M. Al-Sheikhly, M. Christou, C.A. Miller, A. and Kovács, A. Novel Radiochromic Films for Clinical Dosimetry, *Radiat. Prot. Dosim.* **66**(1/4) 263-268 (1996).
- Meigooni, A. Sanders, M. Ibbot, G. and Szeglin, S. Dosimetric characteristics of an improved radiochromic film, *Med.Phys.* **23**(11) 1883-1888 (1996).
- Muench, P. Meigooni, A. Nath, R. and McLaughlin, W. Photon energy dependance of the sensitivity of radiochromic film and comparison with silver halide film and LiF TLDs used for brachytherapy dosimetry, *Med.Phys.* **18** (4) 769-775 (1991).
- Ntroomand-Rad, A. Blackwell, C.R. Coursey, B.M. Gall, K.P. Galvin, J.M. McLaughlin, W.L. Meigooni, S. Nath, R. Rodgers, J.E. and Soares, C.G. Radiochromic film dosimetry: Recommendations of AAPM radiation therapy Committee Task Group 55, *Med.Phys.* **25**(11) 2093-2115 (1998).
- Ramani, R. Lightstone, A. Mason, D. and O Brian, P. The use of radiochromic film in the treatment and verification of dynamic stereotactic radiosurgery, *Med.Phys.* **21**(3) 389-392 (1994).
- Reinstein, L. and Gluckman, G. Comparison of dose response of radiochromic film measured with He-Ne laser broadband, and filtered light, *Med.Phys.* **24**(9) 1531-1533 (1997).
- Reinstein, L. Gluckman, G. and Amols, H. Predicting optical densitometer response as a function of light source characteristics for radiochromic film dosimetry, *Med.Phys.* **24**(12) 1935-1942 (1997).
- Reinstein, L. Gluckman, G. and Meek, A. A rapid color stabilization technique for radiochromic film dosimetry, *Phys. Med. Biol.* **43** 2703-2708 (1998).
- Sayeg, J. and Gregory, R. A new method for characterizing beta-ray ophthalmic applicator sources, *Med.Phys.* **18**(3) 453-461 (1991).
- Saylor, M.C. Tamargo, T.T. McLaughlin, W.L. Kham, H.M. Lewis, D.F. and Schenfele, R.D. A thin film Recording Medium for use in Food irradiation, *Radiat. Phys. Chem.* **31** 529-536 (1988).
- Soares, C.G. and McLaughlin, W.L. Measurement of Radial Dose Distributions around Small Beta Particle Emitters Using High Resolution Radiochromic Foil Dosimetry, *Radiat. Prot. Dosim.* **47** 367-372 (1993).
- Soares, C.G. Darley, P.J. Charles, M.W. and Baum, J.W. Hot Particle Dosimetry using Extrapolation Chambers and Radiochromic Foils, *Radiat. Prot. Dosim.* **39** (1/3) 55-59 (1991).
- Stevens, M. Turner, J. Hugtenburg, R. and Butler, P. High-Resolution dosimetry using radiochromic film and a document scanner, *Phys. Med. Biol.* **41** 2357-2365 (1996).

- Taccini, G. Cavagneto, F. Coscia, G. Garelli, S. and Pilot, A. The determination of dose characteristics of ruthenium ophthalmic applicators using radiochromic film, *Med.Phys.* **24**(12) 2034-2037 (1997).
- Villarreal-Barajas, J.E. Validation of MCNP Monte Carlo calculations and measurements techniques for hot particle beta/gamma dosimetry. *Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering Nice France September 1977.* **35**(2) 1104
- Villarreal-Barajas, J.E. Darley P.J. and Charles, M.W. Comparative measurements of  $^{60}\text{Co}$  "hot particle" depth dose distributions and Monte Carlo calculations, *Radiat. Prot. Dosim.* **85** 507 - 512 (1999a).
- Villarreal-Barajas, J.E. Darley, P.J. and Charles, M.W. Comparative measurements of  $^{147}\text{Pm}$  beta-particle depth dose distribution using extrapolation chamber, radiochromic dye film and  $^7\text{LiF}$  Ultra thin thermoluminescence dosimeters, *Radiat. Prot. Dosim.* **85** 501-506 (1999b).
- Villarreal-Barajas J.E., *Hot particle dosimetry studies Ph.D. thesis University of Birmingham, U.K.* (1999c).
- Zhigang X., Reinstein, L. Yang, G. Pai, S. and Gluckman, G. The investigation of P-32 wire for catheter-based endovascular irradiation, *Med.Phys.* **24**(11) 1788-1792 (1997).
- Zhongying, L. Shouyong, P. Yundong, C. and Lu, Z. The Response Characteristics of GafChromic Dosimetry Media To  $^{60}\text{Co}$  Gamma rays, *Radiat. Phys. Chem.* **46** 147-151 (1995).
- Zhu, Y. Kirou, A. Mishra, V. Meigooni, A. and Williamson, J. Quantitative evaluation of radiochromic film response for two-dimensional dosimetry, *Med.Phys.* **24**(2) 223-231 (1997).