



MX0000352

Intercomparación Dosimétrica en Unidades de Cobalto 60 Usando Cristales de TLD-100 y CaSO₄:Dy + PTFE

**Enrique Gaona¹, Juan Azorín N.², Miguel Angel Pérez P.³, Moisés Castillo H.⁴,
Felipe Flores F.⁵, Luis V. Guzmán R.⁶**

¹Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco

²Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa

³Instituto Nacional de Cancerología

⁴Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, ISSSTE

⁵Unidad de Oncología, Centro Médico Nacional, IMSS

⁶Unidad de Oncología, Hospital General de México

Resumen

Los protocolos clínicos en radioterapia en la actualidad requieren que las dosis administradas a los pacientes se proporcionen con mayor exactitud, debido a que los procedimientos de diagnóstico por imagen se han sofisticado a tal grado que la información anatómica y localización del tumor se puede obtener con exactitudes menores a un milímetro, además en la mayoría de los casos las imágenes se obtienen en tres dimensiones con lo que se puede hacer radioterapia conformal, donde el simulador ahora es un equipo de tomografía axial computarizada, una resonancia magnética nuclear o una tomografía por emisión de positrones. Se ha demostrado ampliamente que el éxito o el fracaso del tratamiento con radiaciones depende de la dosis administrada al tumor y que la dosis no debe diferir por más de $\pm 5\%$ de la dosis prescrita en los protocolos. El Organismo Internacional de Energía Atómica ha recomendado que los centros de radioterapia sean sometidos a auditorías de garantía de calidad para asegurar que la dosis administrada a los pacientes este dentro del $\pm 5\%$ de la dosis prescrita en radiación externa con unidades de cobalto, menciona también que hay dos maneras de hacer la auditoría de garantía de calidad en radioterapia, una con visitas de expertos a los centros de radioterapia con equipo especial y la otra mediante la intercomparación postal TLD, Las visitas de expertos a los centros de radioterapia con el propósito de hacer una auditoría de garantía de calidad tienen costos muy altos, sin embargo usando fantomas plásticos con TLD los costos se minimizan. El análisis y la intercomparación de las dosis administradas en radioterapia es parte esencial de los programas de aseguramiento de la calidad en el uso de unidades de teleterapia y permite la estandarización de los procedimientos clínicos.

El propósito de este estudio es diseñar y construir un fantoma a base de un polímero termoplástico de metacrilato de metilo que sea reutilizable y que permita hacer un análisis de la dosis absorbida en cristales termoluminiscentes (TL) expuestos a cobalto 60 para establecer la metodología en la intercomparación dosimétrica en unidades de cobalto que permita hacer el seguimiento de los programas de garantía de calidad, estandarización de procedimientos en la calibración, dosimetría e intercomparación postal TLD en radioterapia. Este estudio permite también probar nuevos materiales termoluminiscentes de fabricación nacional desarrollados por Juan Azorín y colaboradores como el $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$. Este es un primer estudio que se realiza en México con el sistema cristal-fantoma para fines de intercomparación en unidades de cobalto 60. En el estudio participan ocho unidades de cobalto 60 de diferentes marcas pertenecientes a cuatro centros de radioterapia. Los resultados de la intercomparación de dosis de las ocho unidades de cobalto 60 estuvieron en el rango de 0.95 a 1.13, considerando que los valores entre 0.95 y 1.05 se consideran aceptables en términos de lo exigido por la legislación actual.

Palabras clave: TLD, intercomparación, cobalto 60, radioterapia

Introducción

La incidencia de cáncer en el mundo se incrementa conforme aumentan las expectativas de vida del ser humano debido a la mejora de la calidad de vida, de acuerdo a las recientes estimaciones de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer y de la Organización Mundial de la Salud, aproximadamente 9 millones de nuevos casos de cáncer son detectados por año en todo el mundo y más del 50% de los casos ocurren en los países en vías de desarrollo, se espera que para el año 2015 este número se incremente alrededor de 15 millones de casos de los cuales dos terceras partes ocurrirán en los países en vías de desarrollo. Más de la mitad (aproximadamente dos terceras partes en México) de los pacientes del mundo entero reciben radioterapia como tratamiento individual o como parte de la combinación de tratamientos¹. La radioterapia es una especialidad multidisciplinaria, la cual usa complejos equipos, fuentes de radiación y personal especializado, requiere de un programa de garantía de calidad que asegure que los pacientes con cáncer están recibiendo una dosis dentro del $\pm 5\%$ de la dosis prescrita con unidades de cobalto 60; sólo de esta manera podrá recibir el paciente un tratamiento que tenga una alta probabilidad de éxito. La garantía de calidad en radioterapia tiene un impacto muy grande en la optimización de la probabilidad del control del tumor, de manera muy esquemática H.K.Awwad², nos da un ejemplo de lo que sucede en términos de la recurrencia del tumor o de pérdida del control del tumor cuando el paciente recibe una buena radioterapia y cuando recibe una radioterapia sin garantía de calidad, tabla 1.

Tabla 1
La influencia de administrar dosis a los pacientes sin tener programa de garantía de calidad en radioterapia en pacientes con la enfermedad de Hodgkin

Radioterapia	Recurrencia		Total
	Si	No	
Adecuada	7(7%)	91(93%)	98
No adecuada	19(33%)	38(67%)	57
Total	26	129	155

El propósito de este estudio es diseñar y construir un fantoma a base de un polímero termoplástico de metacrilato de metilo que sea reutilizable en exposición a radiaciones ionizantes y que permita hacer un análisis de la dosis absorbida en cristales termoluminiscentes (TL) expuestos a cobalto 60 para establecer la metodología en la intercomparación dosimétrica en unidades de cobalto para hacer el seguimiento de los programas de garantía de calidad, estandarización de procedimientos en la calibración, dosimetría e intercomparación postal TLD. Una vez caracterizado y calibrado el binomio fantoma- cristal en términos de dosis se somete a pruebas piloto mediante la intercomparación local de la dosis absorbida que será administrada en los centros de radioterapia y su relación con la dosis medida TLD con el sistema cristal-fantoma. Este estudio permitirá también probar nuevos materiales termoluminiscentes de fabricación nacional desarrollados por Juan Azorín³ y colaboradores como el $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{PTFE}$. Este es un primer estudio que se realiza en México con el sistema cristal-fantoma para fines de intercomparación en unidades de cobalto 60. En el estudio participan ocho unidades de cobalto 60 de diferentes marcas pertenecientes a cuatro centros de radioterapia cuya característica principal es que tienen físicos médicos dedicados a la dosimetría.

Reconociendo la importancia de la exactitud de la dosis en radioterapia, organismos de Naciones Unidas como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecieron programas de dosimetría de radiaciones ionizantes y seguridad radiológica al poco tiempo que fueron fundadas, en 1966, organizó el servicio de intercomparaciones de dosis absorbidas por correo en radioterapia para Cobalto-60, haciendo énfasis el programa en los países en desarrollo a través de los Laboratorios Secundarios de Dosimetría del OIEA. Las intercomparaciones del OIEA/OMS no son sistemáticas ni periódicas y no se aplican a todos los centros de radioterapia, constituyen solamente un muestreo, por lo que su utilidad para corregir errores en las dosis aplicadas a pacientes y para estandarizar protocolos no son viables, ya que los reportes tardan varios meses en llegar. En las intercomparaciones OIEA/OPS los errores de más de un 10% en la dosis aplicada no fueron raros, y en algunos casos se observaron errores hasta de un 50% en la dosis prescrita en perjuicio de los pacientes^{4,5}.

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha recomendado que los centros de radioterapia sean sometidos a auditorías de garantía de calidad para asegurar que la dosis administrada a los pacientes este dentro del $\pm 5\%$ de la dosis prescrita en radiación externa con unidades de cobalto, menciona también que hay dos maneras de hacer la auditoría de garantía de calidad en radioterapia, una con visitas de expertos a los centros de radioterapia con equipo especial y la otra mediante la intercomparación postal TLD, las instituciones que ofrecen estos servicios son: OIEA/OMS, ESTRO en Europa, el Radiological Physics Center(USA) y Radiation Dosimetry Services in North America⁶. También existen programas similares en el Institute Gustave-Roussy de Francia, en el Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety de Finlandia con los mismos objetivos^{7,8}. Las visitas de expertos a los centros de radioterapia con el propósito de hacer una auditoría de garantía de calidad tienen costos muy altos, sin embargo usando fantomas plásticos con TLD los costos se minimizan.

Los protocolos clínicos en radioterapia en la actualidad requieren que las dosis administradas a los pacientes se proporcionen con mayor exactitud, debido a que los procedimientos de diagnóstico por imagen se han sofisticado a tal grado que la información anatómica y localización del tumor se puede obtener con exactitudes menores a un milímetro, además en la mayoría de los casos las imágenes se obtienen en tres dimensiones con lo que se puede hacer radioterapia conformal, donde el simulador ahora es un equipo de tomografía axial

computarizada, una resonancia magnética nuclear o una tomografía por emisión de positrones. Se ha demostrado ampliamente que el éxito o el fracaso del tratamiento con radiaciones depende de la dosis administrada al tumor y que la dosis no debe diferir por más de $\pm 5\%$ de la dosis prescrita en los protocolos. Las investigaciones recientes sobre la biología del cáncer indican que se necesita todavía mayor exactitud en la dosis administrada para lograr un mejor control locorregional y en consecuencia una mayor preservación estructural y funcional de los tejidos sanos. Si la dosis es mayor a la prescrita podemos tener hasta necrosis de los tejidos neoplásicos y sanos, y si la dosis es menor a la prescrita podemos tener recurrencias y metástasis en el paciente. Tan grave es una subdosis como una sobredosis en el control de tumor. En el seguimiento y evaluación del programa de garantía de calidad, tienen un papel muy significativo las intercomparaciones termoluminiscente (TLD) en la determinación y evaluación de la dosis absorbida. El análisis y la intercomparación de las dosis administradas en radioterapia es parte esencial de los programas de aseguramiento de la calidad en el uso de unidades de teleterapia y permite la estandarización de los procedimientos clínicos.

Con relación a la legislación en México, tenemos la **Norma Oficial Mexicana NOM-032-NUCL-1997, Especificaciones técnicas para la operación de unidades de teleterapia que utilizan material radiactivo**, que establece las especificaciones técnicas bajo las cuales las unidades de cobalto 60 deben operar, así como los requisitos que debe cumplir la documentación del registro de las pruebas que se realicen a dichas unidades. En esta norma se establece la verificación y mantenimiento periódico de las unidades de teleterapia. Con relación a la calibración de las unidades de cobalto 60 la norma especifica que debe medirse la tasa de dosis: Antes de iniciar operaciones por primera vez, Cada seis meses calendario; y cuando a los componentes mecánicos y eléctricos de la unidad de teleterapia se les haya realizado mantenimiento preventivo o mayor e Inmediatamente después de realizar el cambio de fuente radiactiva. La tabla 2 nos indica las especificaciones de las unidades de cobalto 60.

Tabla 2
Tolerancias que deben observarse para los diferentes parámetros de las unidades de Cobalto 60.

No.	Parámetro o Prueba	Tolerancia
1	Distanciador óptico-mecánico.	2 mm
2	Posición de exposición.	3 mm
3	Rendimiento (tasa de dosis), cGy/minuto.	3%
4	Coincidencia del campo de luz con el campo de radiación.	3 mm
5	Indicador del tamaño de campo.	2 mm
6	Indicador del ángulo del gantry y del colimador.	1 grado
7	Centrado de la cruz de hilos que señala el isocentro.	2 mm
8	Error y linealidad del contador.	1%
9	Uniformidad de haz contra ángulo del gantry.	3%
10	Rotación de colimador con el isocentro.	2 mm diámetro
11	Rotación del gantry con el isocentro.	2 mm diámetro
12	Rotación de la camilla con el isocentro.	2 mm diámetro
13	Coincidencia de los ejes del colimador, gantry, camilla con el isocentro.	2 mm diámetro
14	Coincidencia del isocentro mecánico y de radiación.	2 mm diámetro
15	Deslizamiento vertical de la mesa.	2 mm
16	Intensidad del campo de luz.	funcional

La norma también nos indica que la calibración y todos los procedimientos dosimétricos los debe realizar solo personal calificado y autorizado por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. Para asegurar que los pacientes reciban un tratamiento enclavado en un programa de garantía de calidad se debe observar que la desviación en la dosis suministrada a los pacientes en tratamiento esté dentro del $\pm 5\%$ del valor establecido en los protocolos clínicos que finalmente es el resultados del cumplimiento global de la tabla 1.

Materiales y métodos

Diseño de los fantasmas de plástico para la intercomparación piloto. En la medición de la dosis absorbida y la calibración de la tasa de dosis de haces clínicos usados en radioterapia se recomienda que esta se realice en agua usando un sistema de dosimetría con cámara de ionización y el protocolo OIEA-277. De esta manera los procedimientos para la medir la dosis absorbida en tejido, el agua constituye el material idóneo, ya que su densidad es muy similar al tejido, pero en algunas circunstancias como en intercomparaciones no es posible usar un fantoma de agua (cubo de acrílico con agua) y un sistema de dosimetría con cámara de ionización, por tal motivo el agua puede ser sustituida por un material plástico sólido con características muy similares al agua y el sistema de dosimetría también puede ser sustituido por cristales termoluminiscentes para medir la dosis absorbida en tejido. En otros países se han empleado materiales sólidos de propiedades y características físicas similares al agua, como acrílico, poliestireno, plexiglás (PMMA), etcétera en combinación con cristales termoluminiscentes para medir la dosis. Aunque se debe usar reglas de conversión de dosis en profundidades en plástico a profundidades en agua para la determinación de dosis absorbida en el material sólido y luego transferirla al agua para finalmente expresarla en tejido, siempre que la afluencia de partículas no se altere considerablemente.

Para el diseño de los fantasmas se tomó en cuenta la experiencia que se ha tenido en estudios previos que hemos realizado con aceleradores^{9,10} y de otros grupos como el Radiological Physics Center, Houston, Tex. y el Organismo Internacional de Energía Atómica. El fantoma diseñado en este estudio fue para medir solamente dosis absorbida y tiene una geometría simple, sólido y cúbico que fue construido de un polímero termoplástico de Metacrilato de Metilo en forma de resina, prácticamente equivalente al agua y tiene insertos del mismo material en el cual se colocan los cuatro cristales TLD-100 o de $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$. El fantoma sólido con TLD tiene las siguientes ventajas con relación al fantoma de agua con cámaras de ionización: exactitud en la profundidad de medición, las mediciones no son en agua, el tamaño, fácil de colocar, bajo costo de producción, bajo costo de envío por mensajería, menores problemas con las cargas eléctricas. El estudio piloto fue realizado por la intercomparación en 8 unidades de cobalto 60. El objetivo del estudio piloto fue evaluar respuesta del fantoma y los cristales TL con haces de fotones del Co-60. Así como su resistencia al impacto, a la temperatura y humedad. Las diferencias entre las dosis medidas por el TLD y las administradas por la institución participante fueron analizadas y evaluadas.

La mayoría de los materiales TL tienen un umbral de dosis a partir del cual la intensidad de la luz emitida por unidad de masa es proporcional a la dosis absorbida en el material TL. Relacionando la dosis dada al material TL y la dosis medida en una masa de tejido hipotéticamente sustituida por el TLD requiere un análisis separado basado en la teoría de la cavidad y el cálculo se puede realizar mediante un análisis de regresión. Entonces la dosis absorbida en general en el TLD puede ser obtenida de las lecturas L observadas para la energía del cobalto 60, es decir,

$$D_{LiF} = \beta_0 + \beta_1 L + \beta_2 L^2 \quad (1)$$

En la determinación práctica de la dosis absorbida en el TLD se hace en referencia a la dosis medida por una cámara de ionización, esto es, se mide la dosis con cámara de ionización y después se coloca en las mismas condiciones el fantoma con los cristales TLD y se les administra una dosis a los cristales de 100, 150, 200 y 250 cGy. Calibración de la unidad de cobalto. Para poder calibrar el fantoma con los cristales TL es necesario tener una calibración primaria de la unidad de cobalto. La calibración se realiza en agua conforme lo exige el protocolo OIEA-277 y conforme al arreglo experimental de la figura 1. Una vez determinada la dosis en agua en condiciones de referencia se convierte a dosis en tejido. La calibración consiste en determinar la tasa de dosis (cGy/minuto) para un campo de 10 x 10 cm a la profundidad de dosis máxima.

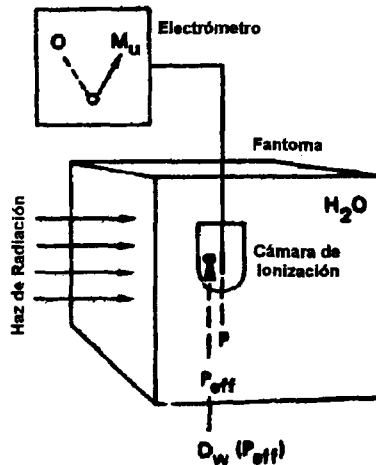


Figura 1, Arreglo para determinar la dosis absorbida en agua con el protocolo OIEA-277

Donde: $D_W(P_{\text{efect}})$ dada por la ecuación (2),

$$D_W(P_{\text{efect}}) = M_U N_D (S_{W,\text{aire}})_U P_U \quad (2)$$

Resultados

Los dosímetros termoluminiscentes deben ser calibrados antes de ser usados para medir dosis desconocidas. La respuesta del TLD es afectada por su historial previo de irradiación y tratamiento térmico. Los cristales deben ser borrados adecuadamente para remover efectos residuales. La curva de respuesta para TLD-100 es generalmente lineal hasta los 10 Gy y más allá de este valor llega a ser supralineal. De manera similar el $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$ la dosis de respuesta es lineal en el intervalo de 3 μGy a 100 Gy. Sin embargo las curvas de respuesta depende de las condiciones en las cuales se lleva a cabo la estandarización y la exactitud que se desea alcanzar. La variabilidad encontrada en el TLD-100 fue de 1.5%, mientras que el

CaSO:Dy + PTFE fue de 3.2%. La respuesta del TLD se define como la termoluminiscencia por unidad de dosis absorbida en el material TL. La figura 2, muestra las dos curvas de calibración obtenidas.

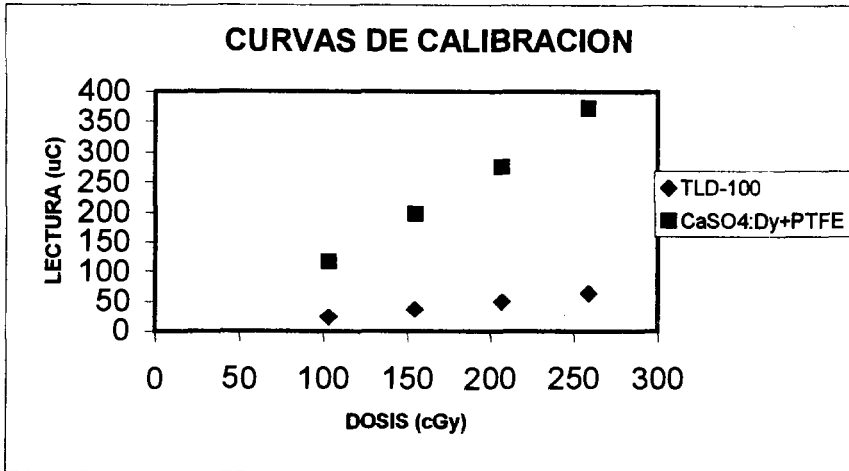


Figura 2, Curvas de calibración usadas en la intercomparación

La tabla 3, muestra los resultados encontrados en la intercomparación dosimétrica, en la columna dos y tres se observa los resultados de la razón de la dosis medida con TLD y la dosis administrada en cada unidad de cobalto 60. Los valores entre 0.95 y 1.05 se consideran aceptables en términos de lo exigido por la legislación actual.

Unidad de Cobalto 60	Dosis (cGy) administrada a cristales	TLD-100 Dosis TLD/Dosis unidad Co-60	CaSO4:Dy+PTFE Dosis TLD/Dosis Unidad CO-60
1	200	1.10	1.13
2	200	1.07	1.08
3	200	1.02	1.02
4	200	1.02	1.03
5	200	1.07	1.08
6	200	1.07	1.08
7	200	1.04	1.04
8	200	0.97	0.95

Valores entre 0.95 y 1.05 se consideran aceptables

Las dosis medidas por los cristales TL, fueron calculadas mediante los siguientes modelos:

Para TLD-100,

$$D = -0.389871 + 4.54544875L - 0.0069796L^2$$

y para $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$,

$$D = 16.3438713 + 0.78397662L - 0.0003584L^2,$$

donde L es la lectura en μC y D la dosis en cGy .

La figura 3, muestra los resultados gráficos comparativos entre las ocho unidades de teleterapia en la intercomparación.

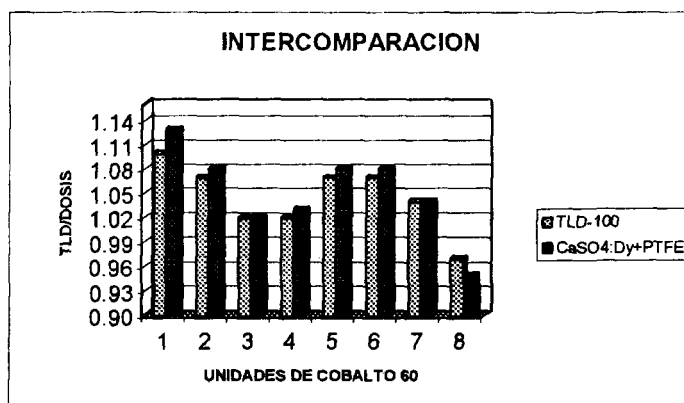


Figura 3, Resultados de la intercomparación en 9 unidades de cobalto 60 con los dos tipos de cristales, Valores entre 0.95 y 1.05 se consideran aceptables.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que es factible usar el fantoma diseñado con los dos tipos de cristales (TLD-100 y $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$) para aplicarse de manera masiva en un programa de aseguramiento de la calidad nacional y regional tanto en instituciones públicas como privadas. La metodología desarrollada con los fantomas y cristales permite estandarizar y hacer seguimiento de programas de garantía de calidad con el propósito de mejorar la dosimetría de radiaciones en radioterapia en el uso de unidades de cobalto 60. El siguiente paso es extender este programa en intercomparación a nivel nacional primero y después a nivel regional.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a las siguientes instituciones que permitieron hacer mediciones en sus unidades de cobalto 60: Instituto Nacional de Cancerología, Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, ISSSTE; Unidad de Oncología, Centro Médico Nacional, IMSS; Unidad de Oncología y Hospital General de México.

Bibliografía

- AEA TECDOC-1040, *Design and Implementation of a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects*, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IAEA, August, 1998.
- Awwad, H.K., *The Impact of Quality Assurance on the Optimization of Tumor Control Probability, Proceeding of the Interregional Seminar for Europe, The Middle East and Africa, Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA-TECDOC-734, 1994, Viena, Austria.*
- Azorín, N.J., *Luminescence Dosimetry, Theory and Applications*, Ediciones Técnico Científicas, S.A. de C.V., 1990.
- OMS, *Empleo Óptimo de la Radioterapia, Serie de Informes Técnicos 644, 1980 Ginebra.*
- Eisenlohr, H.H. and Jayaraman, *IAEA-WHO Co-60 Teletherapy Dosimetry Service Using Mailed LiF Dosimeters, Phys. Med. Biol. 22, 1977.*
- Hanson, W.F. and Järvinen, H., *The Worldwide Quality Audit Network, Proceeding of the Interregional Seminar for Europe, The Middle East and Africa, Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA-TECDOC-734, 1994, Viena, Austria.*
- Hanson, W.F., *Planned Quality Network in the USA, Proceeding of the Interregional Seminar for Europe, The Middle East and Africa, Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA-TECDOC-734, 1994, Viena, Austria.*
- Dutreix, A., Järvinen, J., Thwaites, D.I., *Treatment Unit Calibration, Beam Performance, Proceeding of the Interregional Seminar for Europe, The Middle East and Africa, Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA-TECDOC-734, 1994, Viena, Austria.*
- Gaona, E., y Gómez E., *Organización e Implementación de un Programa de Aseguramiento de la Calidad en Radioterapia, Revista Cancerología, Vol. 42, Núm. 4, Octubre-Diciembre, 1996.*
- Gaona E., y Colaboradores, *Intercomparación TLD en Aceleradores para Radioterapia en tres Países Latinoamericanos", memorias, 1er. Congreso Iberoamericano y del Caribe de Física Médica, noviembre 22-25, 1998, México, D.F.*