

# Cómo destruir un tumor con radiaciones

## La planeación en teleterapia

La planeación en teleterapia es un proceso interactivo entre la propuesta de tratamiento y la simulación de la dosis entregada al paciente. El tratamiento óptimo combina la experiencia clínica y el resultado de la planeación.

Raquel Valdés Cristerna, Verónica Medina Bañuelos  
y Juan Montoya Monterrubio

### INTRODUCCIÓN

Cuando a un paciente se le ha diagnosticado cáncer, las opciones terapéuticas consisten en seguir un tratamiento quirúrgico, farmacológico o a base de la exposición a radiación ionizante (radioterapia), o bien, como sucede en la mayoría de los casos, una combinación de ellos. Cuando se determina que un paciente es candidato a radioterapia, dada la naturaleza del cáncer y su localización, también se define la modalidad del tratamiento. Una opción es exponer el órgano o el tejido dañado a la radiación de una fuente cercana o vecina al tumor (*braquiterapia*); tal es el caso del tratamiento del cáncer cérvico-uterino, en donde las fuentes de radiación son introducidas en el útero por medio de una sonda.

Existe otra modalidad de la radioterapia en la que la fuente de radiación es externa al paciente, por lo que hay una distancia determinada entre el tejido o el órgano dañado y dicha fuente; de ahí que reciba el nombre de *teleterapia*. Esta modalidad se indica en ciertos casos de cáncer como el de hígado, riñón, bazo, etcétera.

El uso de la radiación en el tratamiento contra el cáncer es posible gracias a que las células cancerosas son muy sensibles a sus efectos ionizantes. Sin embargo, también el tejido sano resiente tales efectos si es expuesto a la radiación, aunque en menor medida, puesto que es más resistente a la radiación que el tejido canceroso. Lo anterior impone una condición sobre la aplicación de estos tratamientos: se debe garantizar que el tejido dañado reciba una dosis letal de radiación, mientras que el tejido sano vecino debe recibir la menor dosis posible. La planeación de un tratamiento de radioterapia consiste en un proceso interactivo entre hacer una propuesta de tratamiento y hacer una simulación de la dosis absorbida por el paciente bajo tal tratamiento. El objetivo de la planeación es evaluar la pertinencia de la propuesta terapéutica y de la identificación de los recursos terapéuticos con los que se cuenta. La decisión última sobre el óptimo tratamiento propuesto es producto de la combinación de la experiencia clínica y de un proceso cíclico de planeación.

El objetivo de nuestro grupo de trabajo en este campo ha sido la generación de herramientas auxiliares en la evaluación

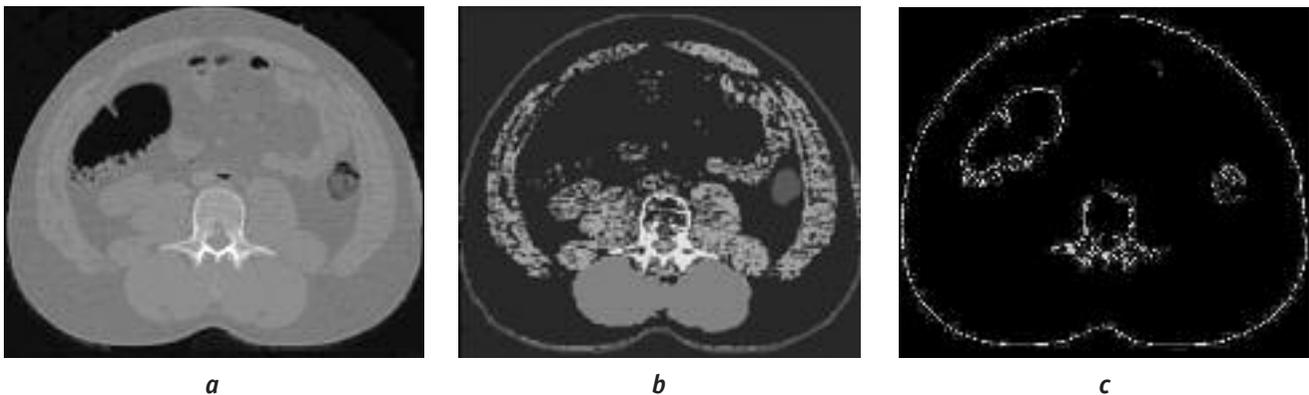
de una propuesta terapéutica en teleterapia, utilizando el procesamiento digital de imágenes.

La planeación de tratamientos en teleterapia consta de diferentes procedimientos, que pueden ser agrupados de la siguiente manera: 1) identificación de la patología, 2) identificación de los recursos terapéuticos, 3) obtención del mapa de distribución de la dosis en el paciente, y 4) valoración de los resultados.

## IDENTIFICACIÓN DE LA PATOLOGÍA

La identificación de la patología se refiere al diagnóstico completo del problema, desde sus causas hasta su ubicación anatómica. Esto último es fundamental para el proceso de planeación, puesto que define las restricciones espaciales de la distribución

**La precisión del proceso de planeación se restringe si hay limitaciones en los recursos disponibles**



deseada de dosis de radiación, y tiene la finalidad de exponer al tejido sano circundante a la menor dosis de radiación, y al órgano destino o blanco a la mayor dosis posible.

Para la referencia anatómica se requiere una imagen del paciente, que puede ser obtenida por tomografía axial por rayos X, o bien por resonancia magnética; ambas permiten una identificación clara de las regiones de interés: el órgano blanco, el tejido crítico, el tejido sano, etc. En la Figura 1a se muestra una imagen de tomografía axial computarizada del abdomen de un paciente.

Con frecuencia, sólo se cuenta con una estimación de los bordes o contornos del paciente y las regiones internas; en las Figuras 1b y 1c se muestran diferentes niveles de representación de la referencia anatómica. En un sistema de planeación de teleterapia computarizado, para cualquiera de los casos mostrados en la Figura 1, es necesario digitalizar la imagen y, si es posible, dividirla en segmentos o regiones

**Figura 1.** *a.* Imagen de tomografía axial computarizada de abdomen del paciente. Se distinguen órganos o tejidos tales como el bazo, la región intestinal y el hígado. Esta imagen constituye la referencia anatómica. En *b* se muestra una imagen segmentada en que sólo se distinguen algunos de los tejidos mostrados en *a*: en blanco se muestra una vértebra, en gris oscuro se representa el bazo, en gris medio se muestran los riñones, en gris claro los intestinos y la capa de piel/grasa. *c.* Contorno del paciente: sólo se muestran los bordes de algunos órganos o tejidos de interés, por ejemplo, bazo, hígado y vértebra.

## La imagen completa del paciente permite una fusión entre el mapa de la dosis y la imagen anatómica

de interés, lo que permite conservar información sobre las diferentes clases de tejido y su posible respuesta particular a la radiación.

### IDENTIFICACIÓN DE RECURSOS

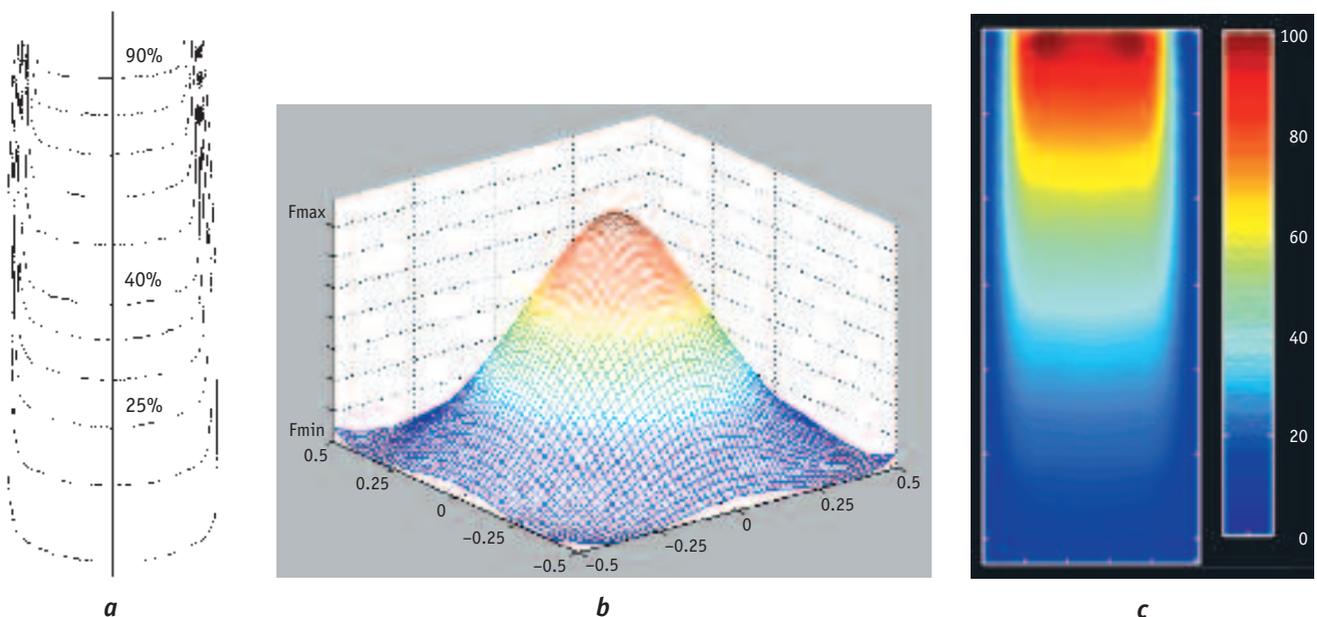
La identificación de los recursos terapéuticos consiste en definir la fuente de radiación que se usará, así como en considerar las particulari-

dades del equipo de teleterapia con que se cuenta y caracterizar los campos de radiación. Identificar tanto la patología como los recursos terapéuticos permite definir el tratamiento óptimo. Es claro que si hay limitaciones en los recursos disponibles, se restringe la precisión del proceso de planeación.

Un elemento básico de la planeación en teleterapia es el de contar con un modelo de propagación de la radiación en un medio específico (agua) para un campo de radiación determinado. Esta distribución espacial de la dosis puede estimarse a partir de conocimientos teóricos sobre las características de la fuente de radiación y su comportamiento probabilístico de interacción con el medio, así como de las restricciones geométricas impuestas por el contenedor de la fuente y la forma del campo (véase el artículo “Los algoritmos genéticos y los métodos de Monte Carlo”, en este mismo número de *Ciencia*). También es posible generar una representación de la distribución espacial de dosis (patrón de curvas de isodosis de cada campo de radiación). Igualmente, pueden emplearse los patrones de curvas de isodosis impresos que el fabricante entrega como parte del paquete accesorio del equipo de teleterapia. En la Figura 2a se muestra un patrón de curvas de isodosis característico para un campo de radiación de cobalto 60.

Es frecuente encontrar unidades de terapia en donde sólo se dispone de patrones impresos de curvas de isodosis para realizar las planeaciones. Para incorporar esta información a un sistema automatizado de planeación, es necesario procesar estos patrones impresos con un digitalizador óptico o escáner,

**Figura 2.** Identificación de los recursos para la planeación: **a.** Imagen binaria (blanco/negro) del patrón de curvas de isodosis; **b.** Gráfica de la función básica de interpolación; **c.** Mapa interpolado de la dosis para el campo de radiación definido en **a.** Para interpolar se usó la función que se muestra en **b.**



con el que se obtiene una imagen binaria, esto es, una imagen de fondo blanco y el trazo de las curvas en negro; estos trazos son el objeto de interés en la imagen. Para etiquetar cada una de las curvas que forman el patrón digitalizado, se le aplica a la imagen binaria un algoritmo destinado al reconocimiento de los trazos.

Como puede observarse en la Figura 2, en el patrón de curvas existen zonas en las que se desconoce el nivel de dosis; en realidad, sólo se conoce la dosis con precisión en las fronteras de dichas zonas. De aquí surge la necesidad de procesar este patrón de curvas, de tal forma que pueda obtenerse una descripción completa de la distribución de las dosis en las dos dimensiones (lateral y profundidad). Para generar este mapa de dosis para un campo de radiación, se utiliza un procedimiento numérico que consiste en calcular los valores de dosis desconocidos a partir de los datos conocidos más próximos. Las funciones matemáticas que se emplean para el cálculo tienen la forma que se muestra en la Figura 2b. En la Figura 2c se muestra el campo de radiación calculado correspondiente al patrón de curvas de isodosis de la Figura 2a. La interpretación se hace de acuerdo con la tabla de colores anexa, en donde los tonos en rojo corresponden a los niveles altos de dosis o zonas “calientes” (el máximo es el 100% de dosis absorbida) y los tonos azules corresponden a los niveles bajos de dosis, o zonas “frías”.

### OBTENCIÓN DEL MAPA RESULTANTE DE DOSIS

Después de identificar la patología y los recursos terapéuticos disponibles, se establecen los parámetros de la planeación del tratamiento:

- a) Técnica de tratamiento.
- b) Características de los campos de radiación (cantidad, dimensiones, colocación, uso de cuñas o charolas, etcétera).
- c) Dosis máxima deseada en el órgano blanco.

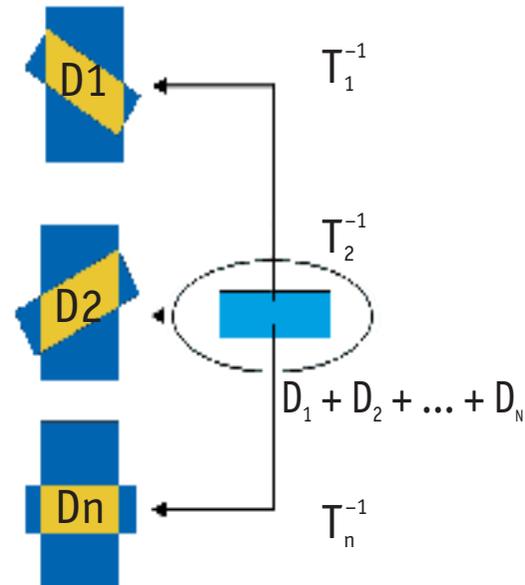
El mapa resultante de dosis se obtiene calculando la dosis absorbida acumulada para cada uno de los campos de radiación prescritos; el cálculo se realiza para cada punto en la referencia anatómica o imagen del paciente.

En la Figura 3 se muestra un esquema de este algoritmo.

En la Figura 4 se muestra el resultado de una planeación en la que se empleó el algoritmo descrito anteriormente y los parámetros señalados en la Tabla 1.

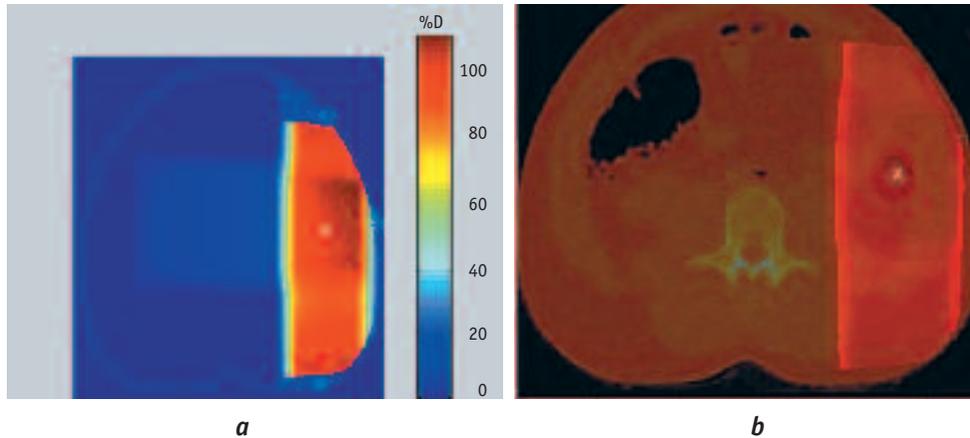
Para la interpretación del mapa resultante se requiere la tabla de colores adjunta, que tiene las mismas características que

### Campo base



**Figura 3.** Algoritmo de retroproyección geométrica para el cálculo del mapa resultante de dosis. Para una zona de interés predefinida, es posible recuperar la contribución de dosis de cada uno de los  $n$  campos rotados y trasladados que intervienen en la planeación, aplicando su transformación geométrica inversa correspondiente.

**El modelo lineal cuadrático describe la muerte de las células según la dosis de radiación que reciben**



**Figura 4.** Mapa resultante de dosis. **a.** El mapa es acotado por el contorno del paciente; los tres círculos azul claro en el borde del paciente señalan el punto de contacto de cada campo de radiación, y la cruz blanca (en un punto interior de la región del bazo del paciente) representa el punto de intersección de los ejes de los tres campos de radiación. En rojo se representan las dosis altas; y en azul, las dosis bajas, de acuerdo con la escala que se muestra junto a la imagen. **b.** El mapa de dosis se ha superpuesto a la imagen anatómica. En naranja brillante se muestran las regiones de altas dosis y se distinguen, en esta franja, los principales tejidos comprometidos: el bazo (órgano blanco), el riñón y el intestino.

la empleada en la interpolación del campo (Figura 2b). El mapa resultante puede presentarse acotado únicamente por el contorno del paciente, como se observa en la Figura 4a, donde la cruz marca el centro del órgano blanco, y los círculos azul claro sobre el borde del paciente indican la entrada del eje del campo de radiación.

Un análisis de la distribución de dosis, haciendo uso de conocimientos de anatomía, permite valorar el resultado: se observa que las “zonas calientes” de la propuesta se encuentran alrededor del órgano blanco, pero también hacia los extremos, en donde se localizan las entradas de los campos; con esta propuesta es posible que se vea en riesgo el tejido intestinal. Si se cuenta con la imagen completa del paciente es posible hacer una fusión entre el mapa resultante de dosis y la imagen anatómica, tal como se muestra en la Figura 4b. En este contexto puede analizarse con mayor precisión el alcance de la distribución: se esquivó la región medular, pero se ponen en riesgo tanto tejido intestinal, como renal.

La riqueza de la interpretación del mapa resultante está en función de la calidad de los recursos empleados para obtenerlo, de la posibilidad de contar con una referencia anatómica adecuada, de la información del campo de radiación y de la precisión del algoritmo de generación de dicho mapa. Sin embargo, puede hacerse una valoración más completa de la propuesta terapéutica si se consideran también los efectos de la radiación en los diferentes tejidos y si se rescata la diferencia fundamental entre tejido sano y tejido canceroso.

**TABLA 1. PARÁMETROS DE LA PLANEACIÓN DEL TRATAMIENTO**

Técnica	Superficie
Fuente	Cobalto 60
Número de campos	3
Tipo de campo	Abierto
Distancia fuente-paciente	80 cm
Dimensiones	10 x 10 cm
Colocación	270°-90°-0°
Pesos	4-1-4
Órgano blanco	Bazo

### VALORACIÓN DE RESULTADOS Y DOSIS BIOLÓGICA EFECTIVA

Considerando la menor capacidad de recuperación que tienen las células cancerosas frente al daño causado por la radiación, respecto a las células normales, se han planteado diversos esquemas para fraccionar la dosis máxima dirigida al órgano blanco, de tal forma que se minimice la acumulación del efecto biológico sobre el tejido sano. Así, los tratamientos se aplican en fracciones o sesiones diarias durante varias se-

manas; de ahí que la dosis por sesión es considerablemente menor que la dosis total, y así el tejido sano es capaz de recuperarse, al menos parcialmente, mientras que el tejido canceroso acumula el efecto. Clínicamente, resulta importante modelar previamente los posibles efectos de la radiación sobre los diversos tejidos del paciente, y en caso de que el tejido sano reciba una dosis importante, es necesario también valorar sus efectos.

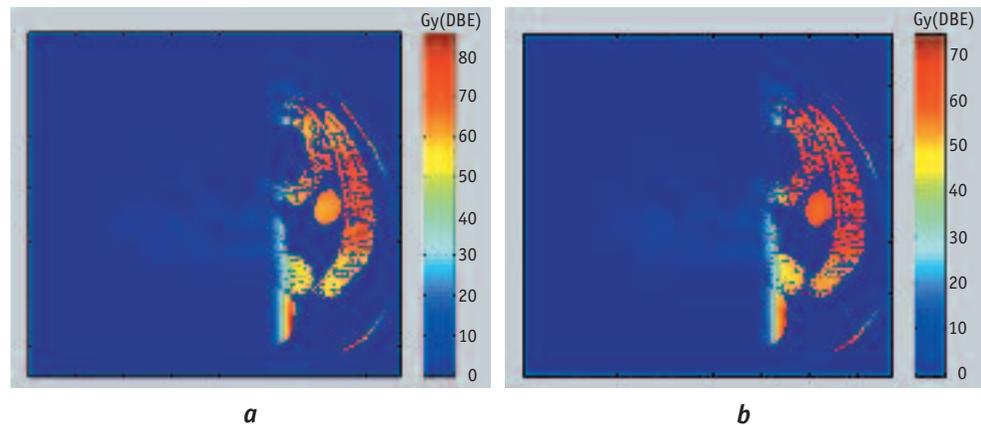
Se ha planteado un modelo que describe la muerte de las células en función de la dosis de radiación que reciben, llamado *modelo lineal cuadrático*. Gracias a este modelo se ha definido la *dosis biológica efectiva*, que es proporcional al número total de fracciones del tratamiento y a la dosis absorbida por fracción, e inversamente proporcional a un factor de calidad de respuesta a la radiación del tejido, que es característico de cada tejido sano, de cada tipo de tejido canceroso, de cada tipo de radiación, etcétera.

Al combinar la imagen segmentada del paciente —en la que cada región de interés tiene asociado el factor de calidad descrito anteriormente— y el mapa resultante de dosis, es posible construir un mapa de dosis biológica efectiva, como se muestra en la Figura 5.

En la Figura 5a se muestra un mapa de dosis biológica efectiva para un esquema de fraccionamiento de 25 sesiones. Es posible observar que se consigue un efecto biológico mayor, tanto en el órgano blanco (el bazo), como en el tejido intestinal circundante; el efecto se reduce notablemente hacia la región posterior del paciente, aunque se alcanza una zona caliente en el extremo del riñón, que es considerado tejido crítico y en donde no es deseable acumular el efecto. En la Figura 5b se muestra el mapa de dosis biológica efectiva para un esquema de fraccionamiento de 35 sesiones; la relación de efecto entre el bazo y el tejido intestinal circundante se mantiene, pero se observa mayor uniformidad del efecto en el órgano blanco y cierta disminución del efecto biológico sobre el riñón (atiéndase a la barra de colores anexa a

cada gráfica). Evidentemente, el segundo esquema de fraccionamiento es mejor que el primero.

El modelo lineal cuadrático también puede ser empleado para recalculer el esquema de fraccionamiento de un tratamiento cuando éste ha sido interrumpido. Mientras mayor sea el periodo de interrupción, el tejido puede



**Figura 5.** Mapas de dosis biológica efectiva. **a.** Mapa para un protocolo de 25 fracciones con dosis máxima de 50 Gy. Se observa una alta dosis en el extremo del riñón e inhomogeneidad en dosis efectiva en el bazo. **b.** Mapa para un protocolo de 35 fracciones con la misma dosis máxima que en **a.** El efecto en el bazo es más uniforme, y la dosis efectiva es menor en el riñón.

**En caso de que el tejido sano reciba una dosis importante de radiación, es necesario valorar sus efectos**

recuperarse de los daños inducidos por la radiación, de tal forma que cuando el tratamiento es reiniciado, es necesario compensar el esquema de fraccionamiento para lograr el efecto biológico deseado o planeado inicialmente.

El cálculo eficiente de mapas de alta definición de dosis (física y biológica efectiva) permite tener mayor control de calidad en el servicio de teleterapia de la unidad clínica, y proporciona mayores elementos para evaluar y, en su caso, corregir la terapia propuesta.

En resumen, el proceso de la planeación en teleterapia está formado por subprocesos específicos de cuya eficacia depende la calidad del resultado final. Esto significa que, en la medida en que los modelos de la distribución de dosis de radiación y los efectos biológicos inducidos por ella sean más precisos, y que el proceso de segmentación de la referencia anatómica sea adecuado, podrá incrementarse tanto la confiabilidad en el uso de los mapas resultantes para la toma de decisiones en la clínica como la convergencia más eficiente hacia la planeación del tratamiento óptimo.

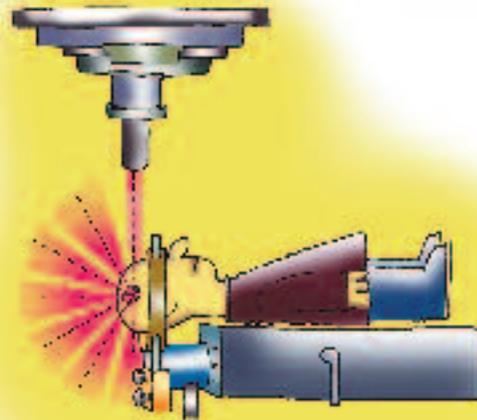
## AGRADECIMIENTO

Agradecemos el apoyo financiero otorgado por el Conacyt para realizar la investigación que describimos en este artículo, por medio del Convenio 29290-A.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bentel, G. C. (1996), *Radiation Therapy Planning*, EUA, McGraw Hill, pp. 32-97.
- Fowler, J. F. (1989), "The linear-quadratic formula and progress in fractionated radiotherapy", *Br. J. Radiol.*, 62:679-694.
- Harder, R. L., y R. N. Desmarais (1972), "Interpolation using surface splines", *J. Aircraft.*, 9:189-191.
- Johns, H. E., y J. R. Cunningham (1983), *The Physics of Radiology*, Illinois, Charles C. Thomas, pp. 336-452.

- Perrin, F., J. Pernier, O. Bertrand, M. H. Giard y J. F. Echallier (1987), "Mapping of scalp potentials by surface spline interpolation", *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 66:75-81.
- Valdés, R., J. Montoya y V. Medina (1998), "Mapas de dosis biológica efectiva en planeación en teleterapia", Memorias de 1er. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, *Rev. Mex. Ing. Biomed.*, pp. 276-278.
- Valdés, R., V. Medina, F. Hassainia y J. Montoya (1997), "Algoritmo para mapeo de dosis de radiación en tratamientos de teleterapia", *Rev. Mex. Ing. Biomed.*, XVIII, 2:25-32.
- Valdés, R., y O. Yáñez (1992), "Planeación de tratamientos en teleterapia", *Rev. Mex. Ing. Biomed.*, XIII, 1:249-258.



**Raquel Valdés Cristerna** es maestra en ingeniería biomédica, y actualmente cursa el doctorado de esta misma disciplina en la UAM-Iztapalapa, donde es profesora-investigadora del área de Procesamiento Digital de Señales e Imágenes Médicas, en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Se dedica al procesamiento digital de imágenes, y es coautora del libro de texto *Imagenología médica*.

**Verónica Medina Bañuelos** es doctora en ingeniería biomédica y profesora-investigadora titular en la UAM-Iztapalapa. Su interés central es la investigación en el procesamiento de información cerebral, tanto anatómica como funcional. Es coautora de los libros *Electrofisiología humana: un enfoque para ingenieros* y *Procesamiento de imágenes biomédicas*.

**Juan Montoya Monterrubio** es licenciado en ingeniería industrial y miembro del Departamento de Radioterapia de la Unidad de Oncología del Hospital General de México. Actualmente trabaja en el área de dosimetría, así como en planeación de tratamientos y control de calidad en radioterapia.