

# Radiación para curar el cáncer

## ¿Qué hay de nuevo?

**En la actualidad, más de la mitad de los casos de cáncer son tratados con radiación, sola o combinada con cirugía o quimioterapia, y miles de pacientes en el mundo han sanado con este tratamiento.**

**María Ester Brandan**

**L**a enfermedad que conocemos como cáncer consiste en la división incontrolada de células anormales que pueden invadir tejidos vecinos y distribuirse a través del sistema circulatorio y linfático y alcanzar otras partes del cuerpo. El cáncer se desarrolla a lo largo del tiempo como consecuencia de una serie de factores asociados lo mismo a nuestro estilo de vida, que a la herencia genética y al ambiente. Muchos tipos de cáncer están asociados con el tabaco, con lo que comemos y bebemos, con la exposición a la luz ultravioleta del Sol y con algunos agentes carcinogénicos (causantes de cáncer) del medio ambiente y de los ambientes de trabajo. En México, el cáncer es la segunda causa de muerte: aproximadamente 57 mil fallecimientos cada año, lo que representa el 13% del total de las muertes.

Una vez que el cáncer es diagnosticado, existen varias opciones para su tratamiento. La se-

lección de alguna, o una combinación de ellas, dependerá del tipo de cáncer, del tamaño de la masa de células anormales (el tumor), de su ubicación, de su grado de avance y del estado general de salud del paciente, entre otros factores. La mayoría de los cánceres pueden ser tratados con terapias que afecten sólo a las células del tumor y a sus órganos cercanos

(cirugía y radioterapia), o bien que utilicen el flujo sanguíneo para llegar a células cancerosas en todo el organismo (quimioterapia, terapia hormonal y terapia metabólica). El objetivo de todas las opciones de tratamiento siempre es eliminar las células malignas protegiendo lo más posible a los órganos sanos.

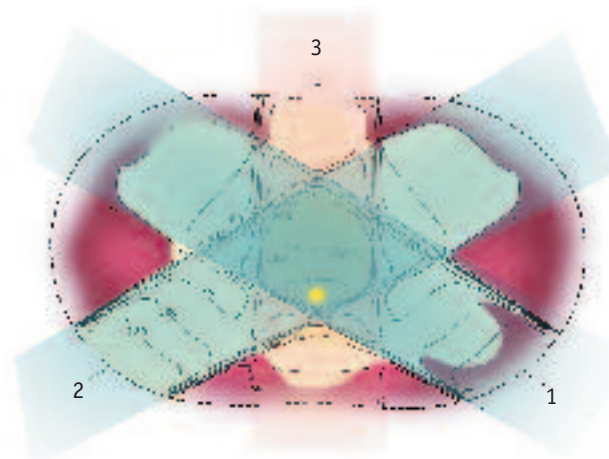
Este artículo describe algunas modalidades existentes para tratamientos con radioterapia externa, en los que haces penetrantes de radiación dañan el material genético de las células anormales, impidiendo que se dividan y proliferen. Las células normales cercanas al tumor irradiado también resultan afectadas, pero pueden reparar el daño recibido de manera mucho más eficaz que las células cancerosas. Esto permite la eliminación selectiva de células anormales que residen cerca de células sanas. En la actualidad, más de la mitad de los casos de cáncer son tratados con radiación, en terapias que generalmente también requieren cirugía o quimioterapia. Miles de pacientes en el mundo han sanado después de estos tratamientos.

La radiación puede ser enviada hacia el tumor desde el exterior o desde el interior del cuerpo. En el primer caso, se utiliza una fuente radiactiva de cobalto 60 o un acelerador de par-

tículas, para producir y dirigir radiación de alta energía hacia el tumor. En el segundo caso, llamado *braquiterapia*, una fuente radiactiva se instala en el interior del cuerpo, muy cerca del tumor, para que, con esa cercanía, alcancen al tumor dosis muy altas de radiación. El gran desafío para la radioterapia ha sido, y sigue siendo, aumentar al máximo la cantidad de energía depositada en el tumor, al mismo tiempo que causar el mínimo daño al tejido sano que lo rodea. A la energía depositada en cada unidad de masa en el tejido irradiado se le llama *dosis*. Antes de cada tratamiento, un físico médico planea los detalles de la irradiación a partir de la información anatómica del tumor, la dosis prescrita por el médico radioterapeuta y las características del equipo con que se va a irradiar. El artículo de Raquel Valdés y colaboradores (“Cómo destruir un tumor con radiaciones. La planeación en teleterapia”), en este número de *Ciencia*, describe técnicas de planeación de tratamientos de radioterapia para el uso de rayos X de alta energía utilizando tres o cuatro haces (campos) de radiación rectangulares fijos, una técnica que se considera tradicional.

En la Figura 1 se muestran cálculos de la distribución de la dosis para un tratamiento tradicional de radioterapia en el que se usan tres campos de radiación, de 8 x 8 cm cada uno, incidentes sobre una región del cuerpo. Las curvas conectan regiones en las que la dosis es similar (curvas de isodosis). Se puede observar que una gran parte del volumen central recibe entre 290 y 310 unidades (arbitrarias) de dosis, y que fuera de la zona en que los tres haces coinciden, la intensidad disminuye rápidamente. Con esta planeación se ha conseguido el objetivo de entregarle la máxima dosis al tumor, que está localizado en la región de traslape de los tres haces. Sin embargo, órganos sanos que se encuentren en el camino de los haces de radiación pueden recibir 50% o más de la dosis máxima. El daño causado a estos órganos puede representar una complicación indeseada para el paciente.

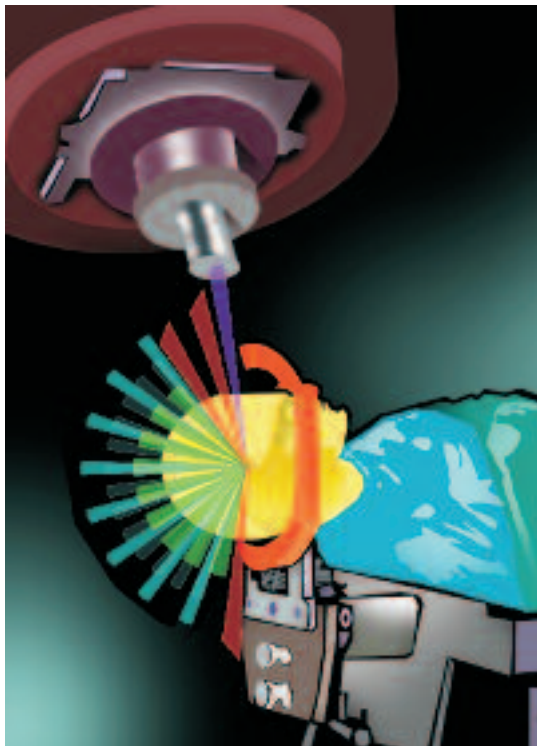
Además de la radioterapia tradicional, ilustrada en la Figura 1, existen nuevas modalidades de radioterapia externa que consiguen mejorar la concentración de la dosis en el volumen del tumor, reduciendo la energía recibida por los órganos sanos vecinos. Tres de estas técnicas —la radiocirugía estereotáctica, la radioterapia conformal y la terapia con protones—, que serán analizadas en este artículo, han sido posibles gracias a varios factores: el avance sostenido en la tecnología de los aceleradores que generan la radiación, la existencia de sistemas poderosos



**Figura 1.** Planeación de tratamiento de un tumor con rayos X. Se usan tres campos de 8 x 8 cm orientados hacia el centro del cuerpo. El óvalo exterior representa el contorno del paciente a nivel del abdomen. El tumor está ubicado sobre la línea central, un par de centímetros por debajo del punto central. Los números sobre las curvas señalan el valor de la dosis.

para la obtención de imágenes del interior del cuerpo del paciente, la disponibilidad de los equipos de cómputo que controlan los sistemas participantes y el desarrollo de algoritmos avanzados para planear los tratamientos. El equipo multidisciplinario a cargo del tratamiento, formado por el médico tratante, el radioterapeuta y el físico médico, cuenta ahora —en hospitales mexicanos y del resto del mundo— con herramientas probablemente inimaginables hace unos pocos años.

**Reto para la radioterapia:  
aumentar lo más posible  
la dosis en el tumor  
y causar mínimo daño  
al tejido sano**



**Figura 2.** Irradiación de un tumor cerebral con radiocirugía estereotáctica. El acelerador y la camilla giran mientras se emiten haces delgados de radiación, todos orientados hacia el tumor, que se encuentra en el vértice de los "abanicos".

## Además de la radioterapia tradicional existen nuevas opciones de radioterapia externa

### RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA

La cirugía estereotáctica ya era usada a inicios del siglo XX por los neurocirujanos para guiar un instrumento penetrante (por ejemplo, la aguja para una biopsia) hacia un lugar específico del cerebro y así operar con gran precisión. Las coordenadas del punto por tratar se determinaban a partir de imágenes de rayos X. Este mismo concepto define a la radiocirugía estereotáctica: en este caso, el instrumento penetrante es la radiación, y las coordenadas del punto por tratar se obtienen con las técnicas más modernas de reconstrucción de imágenes radiológicas: la tomografía axial computarizada y la resonancia magnética. Los equipos de tomografía axial computarizada usan rayos X para obtener imágenes anatómicas del cuerpo, y los resonadores magnéticos usan la respuesta del espín del núcleo de hidrógeno a señales de radiofrecuencia para obtener información anatómica y funcional del cuerpo humano. Ambas técnicas producen imágenes tomográficas (cortes) del cuerpo, con resolución cercana a un milímetro.

La Figura 2 ilustra cómo se irradia un tumor cerebral usando radiocirugía. El paciente se inmoviliza en la camilla por medio de un aparato de fijación —rígidamente ajustado a su cabeza—, que garantiza que las coordenadas entregadas al sistema de planeación correspondan con la anatomía del paciente. Una vez localizado el tumor en las imágenes, avanzados sistemas de cómputo determinan los haces delgados de radiación que mejor entregan la dosis al volumen de interés, al mismo tiempo que minimizan la energía al tejido sano. El movimiento combinado del acelerador que produce la radiación y de la camilla permite describir múltiples arcos que tienen como vértice el tumor. De esta forma, la cantidad máxima de radiación incide sobre el tumor, con altísima precisión, al mismo tiempo que se minimiza la dosis impartida al tejido sano circundante. Una consecuencia de esto es que el tratamiento será mejor tolerado y con mejores resultados que un tratamiento convencional. El volumen irradiado es una esfera con diámetro entre 5 y 40 milímetros; los tumores más complejos requieren irradiaciones consecutivas, con desplazamiento del vértice de los arcos. Los tumores tratados con esta técnica pueden medir hasta 3 o 4 centímetros.

Los tratamientos de radiocirugía pueden efectuarse en una sola sesión, o en varias, tal como ocurre en la radioterapia tradicional. No sólo puede tratarse el cerebro, sino otras partes del cuerpo. En caso de que se requiera más de una irradiación, se colocan marcas sobre el cuerpo del paciente y sobre el aparato de fijación, y se aplican estrictas pruebas de control para asegurar

la reproducibilidad del procedimiento de colocación del paciente en cada sesión. La radiocirugía, al ser una cirugía sin bisturí ni sangre, evita el dolor, las hemorragias, las infecciones y otras complicaciones asociadas con técnicas invasivas.

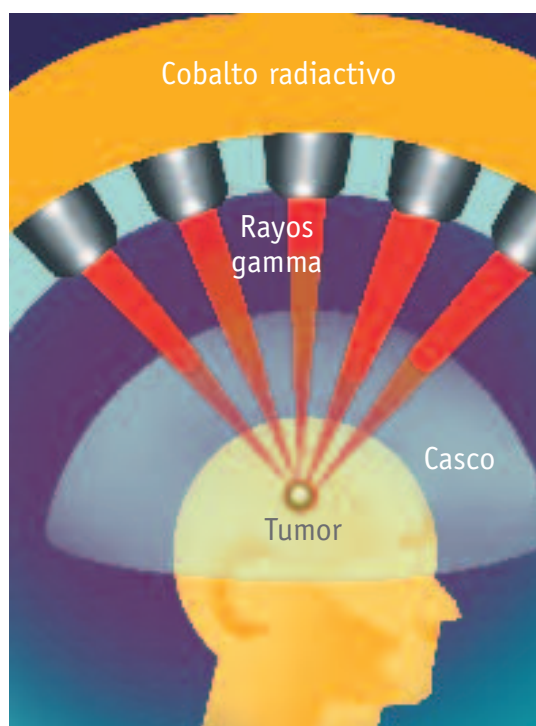
Una modalidad de radiocirugía que no requiere acelerador es el llamado “cuchillo gamma” (*gamma knife*). Esta técnica, representada en la Figura 3, se originó hace 30 años en Suecia como una alternativa a la cirugía en sitios profundos del cerebro, y se estima que hasta la fecha unos 150 mil pacientes han sido tratados en más de 150 hospitales del mundo, cinco de ellos en América Latina. La técnica es simple: se tienen unas 200 fuentes radiactivas de cobalto 60 en un arreglo esférico con forma de casco metálico. Cada fuente emite haces de rayos gamma en una sola dirección, y su arreglo determina en qué dirección ocurrirá la intersección de todos los haces. Este punto se hace coincidir con la ubicación de la lesión intracraneal, conocida a partir de imágenes de tomografía axial computarizada o de resonancia magnética. El cuchillo gamma se usa no sólo para tratar tumores, sino también para eliminar malformaciones de arterias o venas y para tratar pacientes con epilepsia.

### RADIOTERAPIA CONFORMAL

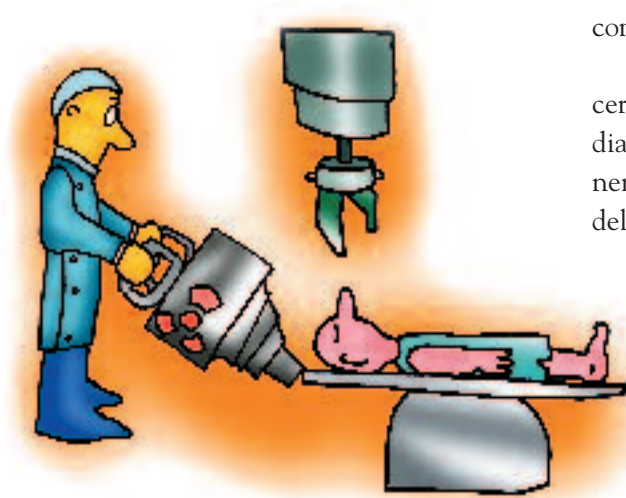
Este término agrupa una serie de técnicas destinadas a hacer coincidir el volumen que recibe la radiación con el volumen ocupado por el tumor. Rigurosamente, la técnica tradicional de campos múltiples rectangulares ilustrada en la Figura 1 es una técnica conformal, pues el tamaño de los campos y su orientación relativa fueron escogidos para aproximar el volumen en que se concentra la máxima dosis de radiación con el volumen del tumor. Pero un análisis simple de la situación descrita en la Figura 1 nos muestra que al usarse campos rectangulares, el acuerdo no es tridimensional. Hoy en día, la radioterapia conformal consiste en mucho más que en usar campos múltiples. Para conformar los volúmenes en tres dimensiones, la forma de cada uno de los campos se adecua al volumen del tumor, y los campos no necesariamente están en el mismo plano.

El primer requisito para aplicar radioterapia conformal a un paciente es contar con información tridimensional precisa sobre la ubicación del tumor, es decir, con una imagen de tomografía axial computarizada o con resonancia magnética. Una vez decidido el volumen que se va a tratar, se pueden diseñar bloques apropiados para cada paciente, que darán forma al campo de radiación que se enviará por cada dirección escogida. El programa de planeación calcula la dosis para cada rayo de un campo de

## El “cuchillo gamma” tiene varias opciones de uso, entre ellas, tratamiento de tumores y de epilepsia



**Figura 3.** Técnica del cuchillo gamma. Las fuentes radiactivas se ubican en el exterior del casco, y su radiación se orienta hacia el tumor cerebral.



**El requisito para aplicar radioterapia conformal es la información tridimensional precisa del sitio del tumor**

radiación dado y para cada elemento de volumen en el tumor, considerando no sólo la radiación primaria sino también la dispersada en las cercanías. El tiempo de cómputo puede llegar a ser 50 a 100 veces mayor que para un cálculo tradicional. Si el físico médico estima que el caso amerita precisión extrema, se pueden hacer los cálculos con una técnica computacional conocida como “simulación de Monte Carlo”. En este caso, se estima el efecto de miles de millones de fotones de los haces de radiación, y se suman dentro del modelo utilizado. Con una supercomputadora este cálculo puede tardarse unos pocos minutos; con una computadora con procesador Pentium, todo un día.

En el caso extremo de que un tumor se encuentre muy cerca, o incluso envolviendo un órgano normal sensible a la radiación, probablemente se deseará impartir la radiación de manera que el volumen expuesto tenga la misma forma irregular del tumor, y el órgano normal no reciba más radiación que la tolerable. Para esto, la tecnología actual ha desarrollado sistemas emisores de rayos X de alta energía equipados con colimadores dinámicos que ajustan la forma del haz durante el movimiento de giro alrededor del paciente. Esta técnica, llamada *radioterapia de intensidad modulada*, se encuentra sólo en unos 60 hospitales en todo el mundo.

Si el hospital cuenta con radioterapia de intensidad modulada, las imágenes se transferirán como archivos desde el equipo de tomografía axial computarizada o desde el de resonancia magnética a la computadora de planeación, y allí se planeará la mejor combinación de haces y de formas que entregarán la dosis. Al acelerador con que se realizará la radioterapia de intensidad modulada se le agrega, a la salida del haz, un dispositivo que consta de hojas metálicas móviles que obedecen instrucciones de “entrar” o “salir” del campo, impartidas por la computadora de control. Al moverse las hojas mientras el cabezal del acelerador gira, las partes del campo que quedan siempre abiertas recibirán la dosis máxima, mientras que las partes siempre bloqueadas no recibirán nada. Así, el intervalo dinámico de dosis puede producirse con un solo campo, creando las formas no homogéneas requeridas por la radioterapia de intensidad modulada. Las exigencias técnicas de la radioterapia de intensidad modulada son muy fuertes: hay que asegurarse de que las hojas del colimador se muevan de cierta forma, que la cantidad de radiación producida por el acelerador sea exacta y que las orientaciones del haz sean correctas. Toda esta información debe ser vigilada en tiempo real, y el acelerador debe ser capaz de apagarse si llega a ocurrir algún error. La experiencia que se tiene con

la radioterapia de intensidad modulada en el tratamiento de cáncer de próstata sugiere que, al poder aumentar la dosis al tumor, se mejora su control local, gracias a que los órganos sanos vecinos ya no resultan tan expuestos. Aún no ha pasado suficiente tiempo como para tener datos respecto a una mejor calidad de vida, pero intuitivamente, esto debería ser una consecuencia del mejor control local.

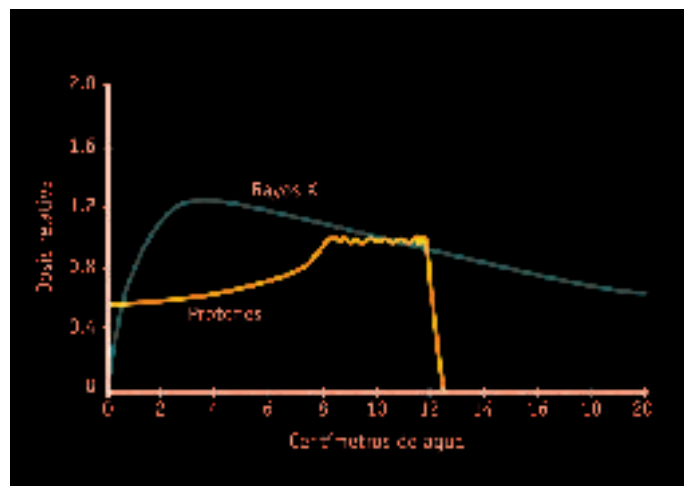
## RADIOTERAPIA CON PROTONES

El uso de partículas cargadas en el tratamiento del cáncer es un viejo sueño que se ha hecho realidad. En el año 1947, el físico Robert R. Wilson, quien veinte años más tarde llegaría a ser director fundador del laboratorio Fermilab en Chicago, sugirió el uso de protones para tratamientos médicos. Los primeros estudios e intentos surgieron todos de laboratorios de física nuclear donde se usaban los aceleradores de protones para realizar investigación básica sobre el núcleo atómico. En 1990 se empezaron tratamientos clínicos exclusivos en el Centro Médico Universitario Loma Linda, en California, iniciándose una verdadera explosión de interés por construir y operar aceleradores, ya fuera en hospitales, o muy cerca de ellos. Hasta fines de 1999, unos 20 mil pacientes habían sido tratados con protones, en unos 30 centros, la mayoría con aceleradores de investigación adaptados para irradiaciones médicas. Las instalaciones modernas para terapia con protones se encuentran en los Estados Unidos, Europa, Canadá, Sudáfrica y Japón.

¿Qué tiene el protón que no tengan los rayos X para tratar un tumor? El protón, esto es, el núcleo del átomo de hidrógeno, es una partícula con carga eléctrica positiva que sigue una trayectoria prácticamente recta cuando incide a gran velocidad sobre un medio. El protón va perdiendo energía gradualmente, a través de su interacción con los átomos del medio; al llegar al final de su trayectoria concentra la energía cedida en un volumen muy pequeño, y luego se detiene. Desde el punto de vista del medio irradiado, la dosis de radiación liberada por el protón es relativamente pequeña al inicio de la trayectoria y máxima al final de su camino, y no se extiende más allá.

La Figura 4 muestra una gráfica con curvas de dosis para protones y para rayos X de alta energía. Puede apreciarse la gran diferencia entre ambos tipos de radiación: si un tumor se encontrara a 10 cm de profundidad, los rayos X irradiarían tan-

## Las coordenadas del punto por tratar se obtienen con lo más moderno en reconstrucción de imagen



**Figura 4.** Curvas de dosis para protones y para rayos X incidentes en agua.

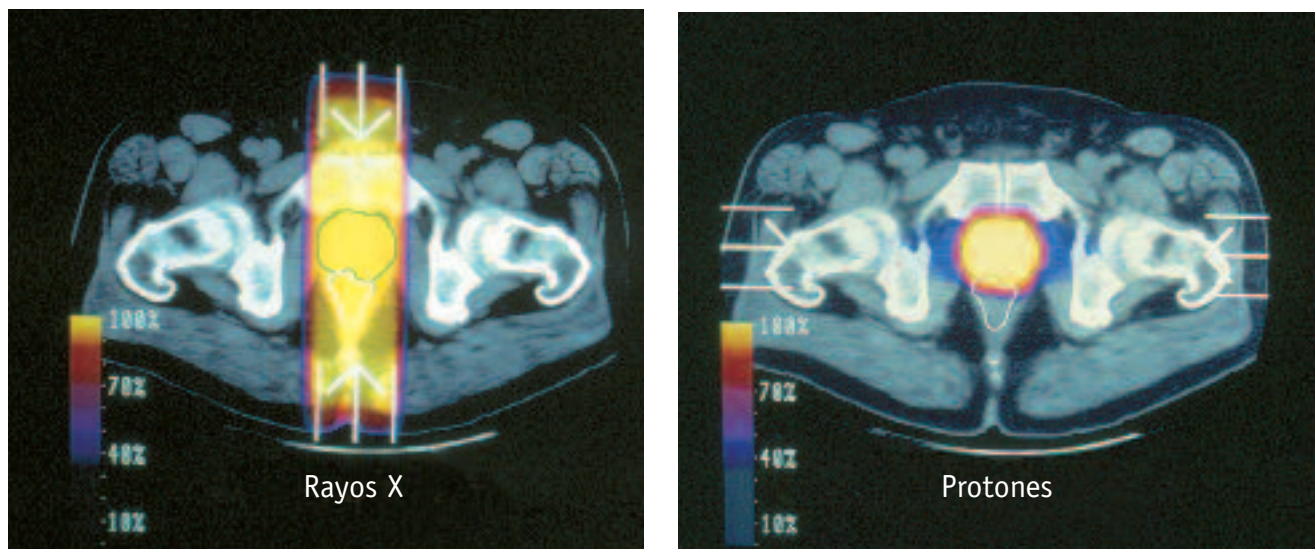
to el tejido que está enfrente como el que está detrás del tumor. En cambio, los protones liberarán preferencialmente su energía al final de su trayectoria. La posición del máximo (conocido como *pico de Bragg*) depende de la energía con la que el protón entra al medio, y este parámetro se ajusta para que coincida con la profundidad del tumor. El ancho del pico de Bragg se puede modular usando cuñas que eliminen parte de la energía del haz de protones.

La forma característica en que los protones liberan su energía en los tejidos se refleja en la planeación de tratamientos de radioterapia. La Figura 5 muestra planes de tratamiento para

**La forma en que los protones liberan su energía en los tejidos se refleja en la planeación de la radioterapia**

cáncer de la próstata con dos campos de rayos X o de protones. El color indica los niveles de dosis alcanzados en las regiones irradiadas. Puede verse cómo el volumen irradiado por protones está mucho mejor definido que con rayos X. Esto asegura que se reduce el daño indeseado a los órganos sanos cercanos al tumor.

La construcción del centro médico en la Universidad de Loma Linda, iniciada en 1975, aprovechó la experiencia que se había ganado en los laboratorios de física nuclear de Berkeley y Los Álamos en el tratamiento de pacientes con haces de iones extraídos de sus aceleradores de investigación. Se decidió construir un acelerador médico de protones (y no de otros iones) debido a la similitud en los efectos biológicos



**Figura 5.** Planeación de tratamiento de cáncer de la próstata usando rayos X y protones. (Cortesía del Centro Médico Universitario Loma Linda.)

causados por estas partículas y la radiación electromagnética tradicionalmente usada en radioterapia.

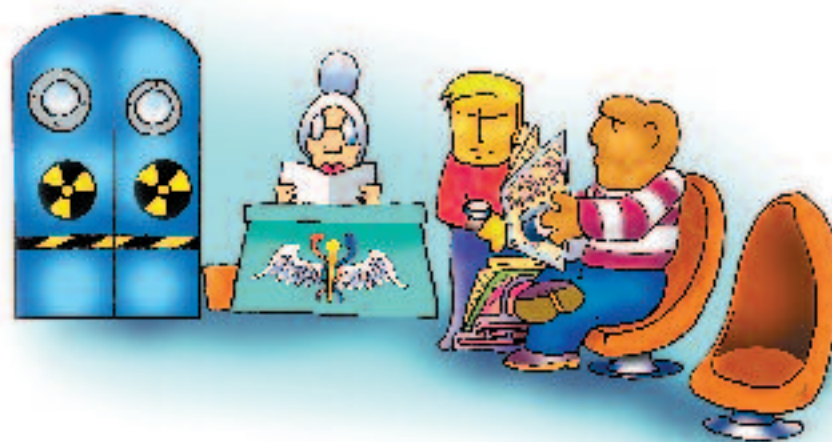
Aunque la idea original de Wilson fue propuesta hace más de medio siglo, la realidad actual de contar con haces que concentran su energía en el volumen tumoral ha requerido avances científicos y tecnológicos no existentes hace unos pocos años: el volumen del tumor debe conocerse con precisión, lo que sólo ahora es posible gracias a las imágenes de tomografía axial computarizada y de resonancia magnética; el acelerador debe estar incorporado a un centro hospitalario, lo que antes no era posible por la complejidad de la operación de los aceleradores de investigación en física nuclear y de altas energías; y el costo del acelerador debe permitir su operación como servicio de salud.

Los resultados obtenidos con los pacientes tratados hasta ahora son buenos. Los pacientes escogidos para esta terapia su-

fren principalmente de cáncer en la próstata, melanoma ocular o tumores en la base del cráneo; todas estas patologías requieren excelente localización de la dosis para proteger los órganos sanos vecinos al tumor, y los protones resultan ser el instrumento ideal.

## CONCLUSIONES

La medicina actual está caracterizada por el uso de tecnología avanzada, tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de las enfermedades. México no se ha quedado atrás en la compra de equipos que ofrecen al paciente y al médico estudios anatómicos, funcionales y metabólicos de gran especialización. La radiocirugía estereotáctica, el cuchillo gamma y la radioterapia conformal son opciones que ya existen en nuestro país. La integración de equipos humanos interdisciplinarios, en que colaboren médicos, biólogos, físicos, ingenieros y matemáticos, permitirá el uso óptimo de estas herramientas, así como el posible desarrollo de modalidades novedosas que conduzcan a mejores servicios de salud.



## BIBLIOGRAFÍA

- Brandan, M. E., R. Díaz Perches y P. Ostrosky (1998), *La radiación al servicio de la vida*, Colección La Ciencia para Todos, México, Fondo de Cultura Económica.
- Cortinas, C. (1998), *Cáncer: herencia y ambiente*, Colección La Ciencia para Todos, México, Fondo de Cultura Económica.
- Páginas de internet con información general sobre cáncer y radioterapia:
- [http://cis.nci.nih.gov/fact/7\\_1.htm](http://cis.nci.nih.gov/fact/7_1.htm)
- <http://www.cancerindex.org/clinks4r.htm>
- <http://www.oncolink.com/templates/treatment/index.cfm>
- <http://www.irsa.org/>
- <http://www.proton-therapy.org/howit.htm>

---

**María Ester Brandan** es doctora en física por la Universidad de Wisconsin-Madison, e investigadora titular del Instituto de Física de la UNAM. Se especializa en física nuclear experimental y en dosimetría, áreas en las que realiza investigación y docencia. Es también coordinadora de las actividades académicas de la maestría en Física Médica de la UNAM.