

Radioterapia en la enfermedad oncológica en el siglo XXI

M. Ángel Casanova

*«Cuanto más alto se eleva un hombre,
más pequeño les parece,
a quienes no saben volar»*

(FRIEDRICH NIETZSCHE)

Recuerdo histórico

La Radioterapia constituye una de las especialidades de la Medicina que comenzó a instaurarse a partir del descubrimiento de los rayos X. Se fundamenta en la aplicación de las radiaciones sobre el organismo humano, con fines terapéuticos. Concretamente el 8 de Noviembre de 1895 el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen leyó ante la Sociedad Físico-Médica de Würzburg un informe sobre el descubrimiento de los rayos X. El descubrimiento surgió de forma accidental mientras realizaba ensayos con un tubo de rayos catódicos (tubo de Lenard) al observar la iluminación de una pantalla queotónica cada vez que sometía el tubo a una descarga eléctrica. Intrigado por el fenómeno, decidió sustituir el tubo de Lenard por un tubo de Hittorf y la pantalla por una placa de platinocianuro de bario; observando la persistencia de luminosidad fluorescente de las sales de bario, incluso intercalando varios objetos (páginas de papel, cartas de naipes, un libro, una caja de madera) entre el tubo y la placa. Finalmente interpuso la mano de su esposa y observó el dibujo de la estructura ósea impresionado sobre la placa. Es así como nació la primera radiografía. Como consecuencia de la naturaleza desconocida de estos rayos invisibles, Roentgen los llamó Rayos X. Posteriormente, en 1901

le fue otorgado el Premio Nobel de Física y en su honor se le dio el nombre de Rayos Roentgen.

En 1896 el físico francés Antoine Henri Becquerel, comprobó que determinadas sustancias como las sales de uranio, emitían radiaciones penetrantes de origen desconocido. Ello fue debido también a un hallazgo casual, como consecuencia del ennegrecimiento (impresión) de unas placas fotográficas que guardaba en el cajón de la mesa, sobre la que manipulaba con las sales de uranio. También observó que los rayos que impresionaban la película fotográfica podían descargar un electroscopio, de donde dedujo que dichas radiaciones poseían carga eléctrica.

En 1898 el matrimonio Marie y Pierre Curie, químicos franceses, aportaron un importante avance al estudio de las radiaciones y más concretamente al concepto de radiactividad, al llegar a la conclusión de que la Plecbenda, un mineral de uranio, tenía que contener otros elementos radiactivos, ya que presentaba una capacidad radiactiva más intensa que la de las sales de uranio empleadas por Becquerel. El ensayo de diferentes tratamientos químicos de la plecbenda les llevó al descubrimiento de dos nuevos elementos radiactivos: el polonio y el radio; posteriormente también descubrieron que el torio era radiactivo. De esta forma llegaron a medir el calor asociado a

Palabras clave: Historia Rx y radiaciones. Radioterapia oncológica actual. Onco-radioterapia del futuro.

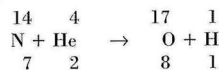
Fecha de recepción: Junio 2001.

Seminario Médico

Año 2002. Volumen 54, N.º 1. Págs. 47-74

la desintegración del radio, estableciendo que un gramo de radio desprende aproximadamente 420 Julios de energía por hora. Marie y Pierre Curie, junto con Henri Becquerel, compartieron en 1903 el Premio Nobel de Física.

En 1899 el químico francés André L. Débierne descubre el actinio, y en el mismo año, los físicos ingleses Frederick Soddy y Ernest Rutherford descubren el gas radiactivo conocido por radón, emitido y relacionado con los elementos radiactivos conocidos (uranio, torio, radio y actinio). Resultando de dichas investigaciones el descubrimiento de la emisión, por los referidos elementos, de tres tipos de radiación diferente: inicialmente las alfa (α) y beta (β). Posteriormente la gamma (γ). Las alfa y beta están formadas por partículas cargadas eléctricamente y se denominan en la actualidad bajo el término de partículas. Las partículas alfa son núcleos de helio y las partículas beta son electrones. La emisión de las correspondientes radiaciones, provocan la transmutación del núcleo del elemento emisor en un núcleo de elemento diferente. Rutherford, en 1919, procedió al bombardeo de núcleos de nitrógeno con partículas alfa y los convirtió en núcleos de hidrógeno y oxígeno, consiguiendo de esta forma la primera transmutación artificial de los elementos.

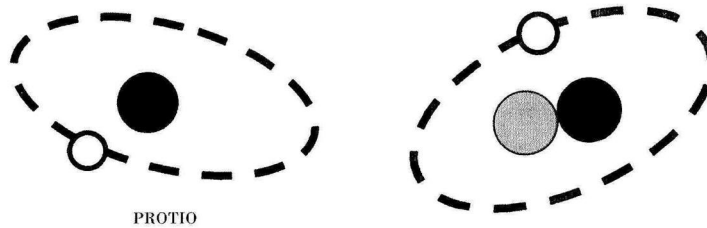


El experimento lo realizó al hacer que una sustancia radiactiva emisora de partículas alfa se desintegrara en la proximidad de un recipiente de vidrio de finas paredes en el que previamente había realizado el vacío. Las partículas alfa conseguían atravesar el vidrio, quedando atrapadas en el interior del recipiente y pasados unos días, mediante la colocación de un espectroscopio, se comprobó la presencia de helio elemental contenido en el recipiente. La aplicación posterior de un campo eléctrico demostró que las partículas alfa se desviaban hacia el polo negativo en tanto que las partículas beta lo ha-

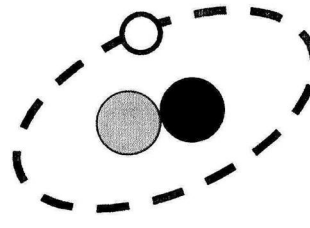
cían hacia el positivo. De forma consecutiva las emisiones radiactivas fueron sometidas a la acción de campos eléctricos y magnéticos confirmándose la composición de las partículas alfa por cargas positivas o Protones y las beta por cargas negativas o Electrones y de otra parte se demostró que los rayos gamma eran ondas o radiaciones electromagnéticas sin carga eléctrica o sea eléctricamente neutras, de naturaleza similar a los rayos X pero con una energía mucho más elevada, lo que las hace más penetrantes. Se llegaba de esta forma a la determinación de las partículas y radiaciones elementales y el átomo se definía como una partícula elemental cuyo núcleo central, muy denso, está formado por protones y rodeado por una nube de electrones en igual número que el de protones tratándose de un átomo no ionizado. En 1932 el físico inglés James Chadwick junto con el matrimonio Joliot-Curie, descubren que el núcleo está integrado, además de los protones, por un número igual de partículas carentes de carga eléctrica a las que denomina Neutrones.

Es así cómo quedó configurada la estructura atómica y las tres formas elementales de desintegración del núcleo atómico. No obstante, la evolución ha continuado y las múltiples hipótesis en investigación nuclear vienen desarrollando nuevas teorías que demuestran que las partículas alfa y beta son tan solo unidades muy discretas de materia y que la desintegración radiactiva es un proceso en el que los átomos se transforman mediante la emisión de una de estas partículas (alfa o beta) en nuevos tipos de átomos con propiedades químicas totalmente nuevas y diferentes. De ahí el reconocimiento científico de que los propios átomos poseen una estructura interna, y que no son por tanto las últimas partículas o elementos fundamentales de la naturaleza. Finalmente los rayos gamma fueron identificados como ondas electromagnéticas, similares a los rayos X pero con una longitud de onda menor, lo que las hace más penetrantes.

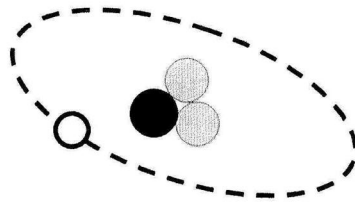
Isótopos del Hidrógeno



PROTIO



DEUTERIO



TRITIO

PROTÓN



NEUTRÓN



ELECTRÓN



El hidrógeno siempre tiene un protón en su núcleo, cuya carga está equilibrada por un electrón. Sin embargo el número de neutrones puede variar, lo que da lugar a *isótopos* que tienen el mismo comportamiento químico pero diferente masa (*núcleos más pesados*).

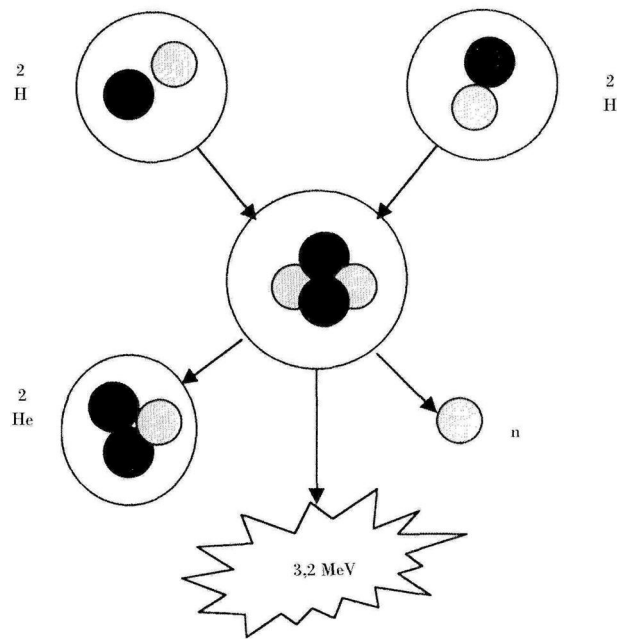
PROTIO = sin neutrones

DEUTERIO = 1 neutrón

TRITIO = 2 neutrones

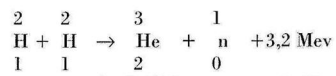
La fusión de dos núcleos de isótopos de hidrógeno, inducidos por calor, origina una importante liberación de energía con relación a la temperatura en que se producen dicha fusión. De ahí que se las conozca como reacciones termonucleares.

FUSIÓN



50

La FUSIÓN de dos núcleos ligeros libera millones de electrón - voltios (MeV), como ocurre cuando dos núcleos ligeros de Hidrógeno (Deuterio) se combinan según la reacción:



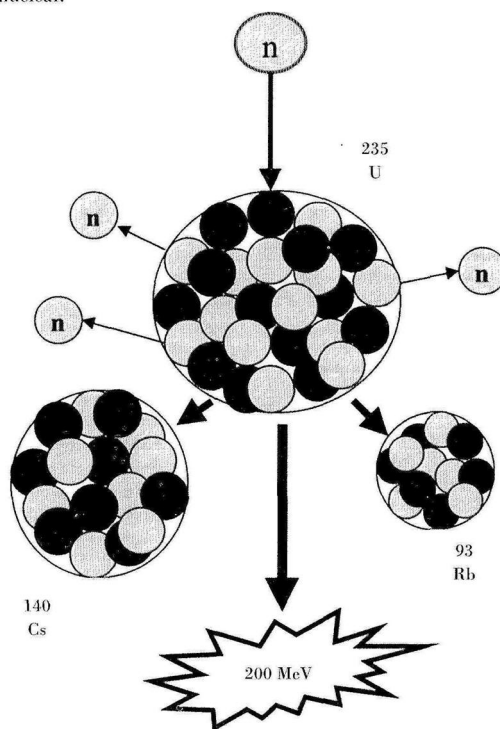
para producir un núcleo más pesado de Helio, un neutrón libre y una energía de 3,2 MeV equivalente a:

$$5,1 \times 10^{-13} \text{ Julios}$$

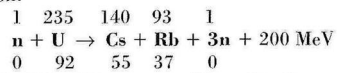
Aunque la energía liberada en una reacción de fusión es menor que en la de fisión, la cantidad de átomos es mayor: 0,5 kg. de un isótopo de Hidrógeno pueden liberar el triple que la del uranio, lo que supone una energía equivalente a 30 kilotonas de trinitrotolueno; pero ello requiere la fusión de la totalidad de los átomos de hidrógeno, para lo que se precisa una temperatura de varios millones de grados.

FISIÓN NUCLEAR

Cuando un átomo de Uranio 235 es bombardeado por un neutrón se divide en 2 átomos de Cesio y Rubidio, liberando gran cantidad de energía y tres neutrones adicionales. Si los tres neutrones no son controlados pueden hacer que otros átomos de Uranio 235 se dividan originando una reacción en cadena dando lugar a una gran explosión por fisión nuclear.



Cuando se induce la FISIÓN de un núcleo pesado como el Uranio 235, mediante la absorción de un neutrón:



se produce Cesio 140 y Rubidio 93 junto a una liberación de energía de 200 MeV, equivalente a:

$$3,2 \times 10^{-13} \text{ Julios}$$

Evolución

La primera referencia que se tiene del empleo de las radiaciones como medio terapéutico sobre células cancerígenas data de 1896, año en el que se utiliza la aplicación de R. X en el tratamiento de un cáncer de mama. Posteriormente en el inicio del siglo XX, los propios investigadores Becquerel y Pierre Curie se producen de forma casual, quemaduras dérmicas, al contacto con fuentes de radio que portaban en sus vestimentas. Fue F. de Courmelles en 1901 quién describe el efecto de este tipo de radiación sobre el organismo bajo los términos de «penetrantes y nocivas» y las denomina «quemaduras químicas», tras de haberse producido una quemadura dérmica en el abdomen al guardar una fuente de radium en uno de los bolsillos de su chaleco.

En 1918 M. Curie y Bémont proponen el radium 226 como fuente de irradiación gamma a distancia; siendo Lahm en 1921 el que utiliza una fuente de radium introducida en un tubo de radón y lo coloca a distancias entre 5 y 10 cm de la superficie dérmica para tratar un cáncer de piel. Técnica que comienza a utilizarse en el Middlesex Hospital de Londres y en el Instituto de Radium de París, Bruzaud y Ferroux utilizan 4 gr de radium repartidos en 80 grupos de 50 mg. De forma consecutiva Sluys y Kessler utilizan hasta 13 fuentes de 100 mg colocadas sobre una semiesfera de manera que los haces convergían en profundidad sobre los tejidos y órganos irradiados. De esta forma se va perfeccionando la técnica de irradiación a distancia por medio de la Telecurieterapia.

De forma paralela la aplicación directa de agujas de radium sobre las lesiones de piel iba evolucionando, y se pasaba del Radio 226 a la utilización de otros isótopos como: Cesio 137, Euripio 152 - 154, Yodo 131, Oro 198, Estroncio 90, Iridio 192 etc. Nació así la **Braquiterapia** conocida también como **Curiterapia** en honor de sus descubridores.

A final de la segunda guerra mundial, los radioelementos artificiales descubiertos,

desde 1934 por Irene y Frédéric Juliot Curie, son producidos en cantidad creciente; la utilización del ciclotrón y sobre todo de pilas atómicas facilita la generación de nuevos radioelementos; siendo el Cobalto 60 emisor de radiación gamma de alta energía, con período de semidesintegración superior a 5 años y una actividad específica elevada, es propuesto en 1948, por Grimmett en Canadá para sustituir al radium en los aparatos de telecurieterapia.

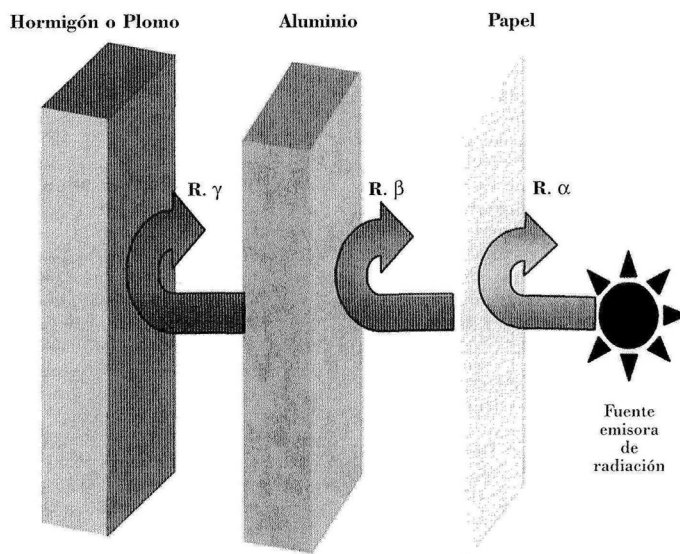
En 1951 dos fuentes de Cobalto, con actividad de 1000 Ci cada una, son generadas en la pila atómica de Chalk - River en Canadá y son instaladas: una en el Hospital de Saskatoon (Canadá) y otra en el Hospital Victoria de Londres.

Nace así la **Telecobaltoterapia** que permite la irradiación a diferentes distancias y con la posibilidad de aplicación estática y dinámica.

Las expectativas eran un tanto prometedoras, hasta que el efecto biológico se hizo ver y se produjo el desequilibrio entre el efecto curativo sobre las lesiones y el efecto destructivo sobre los tejidos sanos, que las radiaciones en sí producían. Tampoco había definidas unidades de medida que valorasen la cantidad de radiación aplicada y sólo valoraciones subjetivas del «efecto eritema», daban una remota idea de su efecto agresivo y nocividad. Ello fue motivo de inquietud para que se estableciese un sistema de medidas y en 1928 se instauró oficialmente en Suecia la unidad de radiación a la que se denominó «**Roentgen**».

El **roentgen** se consideró para valorar el efecto que la radiación producía sobre el tejido dérmico y fue sustituida posteriormente, en la década de los 70 por el rad considerada como magnitud de dosis absorbida y definida como la energía depositada por cualquier radiación ionizante por unidad de masa del tejido irradiado. El rad quedó determinado como la absorción de una energía de 100 ergios por gramo de masa irradiada. Posteriormente se consideró el **Gray** como unidad del Sistema In-

EMISORES DE RADIACIÓN



Cuando un cuanto de radiación o fotón, correspondiente a una emisión de R.X de baja energía, choca contra un átomo, produce la expulsión de un electrón y le transfiere dicha energía en forma de energía cinética, a esta forma de transferencia o absorción se le denomina **efecto Fotoeléctrico**.

Si un fotón de alta energía producido por R.X o R. γ , choca contra un átomo, el fotón incidente cede parte de su energía al electrón, expulsándolo del átomo, y continúa su trayectoria saliendo del átomo con una energía más pequeña y una longitud de onda más larga. A la desviación de estas partículas, acompañadas de un cambio en la longitud de onda se la denomina **efecto Compton**.

Un tercer tipo de absorción de las radiaciones por la materia, lo constituye el fenómeno conocido por **Formación de Pares**, en el que un fotón de elevada energía (superior a 1,2 MeV) al incidir sobre la capa electrónica cercana al núcleo atómico, genera dos electrones de carga diferente, uno con carga negativa y otro con carga positiva (**Positrón**), cediéndoles su energía en forma de energía cinética ambos saldrán del átomo en trayectorias divergentes.

Las partículas α tienen carga positiva y son poco penetrantes, son detenidas por una simple lámina de papel.

Las partículas β poseen carga negativa y pueden atravesar la madera pero son detenidas por una pantalla de aluminio.

Las radiaciones γ son las más penetrantes, sólo son detenidas por el Pb y gruesos bloques de hormigón.

ternacional y define la energía de 1 Julio por kilogramo de masa de tejido irradiado.

A pesar de que la magnitud de dosis absorbida es un concepto muy útil, ocurre que debido a los diferentes tipos de radiación, el efecto biológico con relación al daño producido es distinto, de ahí que se considere una unidad conocida como Sievert para valorar el efecto biológico, especialmente cuando se desea valorar la suma de dosis debida a la acción de diferentes radiaciones; considerando a esta unidad en el SI como **Dosis Equivalente (H)** y resulta de multiplicar la dosis absorbida por un **factor de calidad (Q)**, que depende del tipo de radiación aplicada y concretamente de la densidad de ionización y del

$$1 \text{ Gy} = \text{Jul. / Kg.} = 100 \text{ ergios / gramo} \\ = 100 \text{ rads} = 100 \text{ cGy}$$

Dosis Equivalente H = Dosis absorbida
en Gray x Q

Q para radiaciones Alfa = 20

Q para R.X, Gamma, Beta, Electrones y
Positrones = 1

Q para Neutrones = 10

54

número de iones por unidad de longitud que las distintas radiaciones producen a lo largo de su recorrido por el organismo. Como unidad específica se utiliza el **mili-sievert**, actualmente es la unidad que define la dosis equivalente en las lecturas mensuales de los dosímetros personales y de área utilizados en las instalaciones radiológicas y radiactivas.

Sucesivamente, los estudios y ensayos de laboratorio llevados a cabo (más concretamente en la década de los 50, cuando modelos y cultivos celulares se someten a la irradiación y se valoran los efectos biológicos producidos en relación con las dosis aplicadas); van estableciendo de manera fehaciente el efecto cuantitativo de las radiaciones ionizantes sobre cada sistema y órgano específico del cuerpo humano. Hoy día constituyen la base fundamental para la

valoración de dosis aplicables, dosis de exposición, dosis máximas permisibles, dosis de exposición para los operadores en instalaciones radiológicas y radiactivas etc. Conceptos y normativas registradas y controladas por los servicios de Radioprotección instaurados preceptiva y legalmente en todos los centros perteneciente a la medicina, industria o investigación y en los que sean utilizados medios técnicos naturales o artificiales para la manipulación o generación de energía radiactiva.

Inicialmente la aplicación de radiaciones con fines terapéuticos, era realizada por diferentes especialidades médicas: ginecólogos, cirujanos, dermatólogos etc. De forma progresiva se fue delimitando al campo de la Radiología y se compartía esta especialidad entre el diagnóstico por la imagen y la aplicación en el tratamiento de procesos oncológicos.

En España, concretamente en la Facultad de Medicina de Madrid, se crea en 1943 la primera cátedra de Radiología, dirigida por el profesor **D. Carlos Gil y Gil**, pionero desde la década de los veinte en el manejo de las radiaciones como arma terapéutica y al que siguieron en esta labor sus hijos **Carlos y Miguel Gil Gayarre**.

En Jaén en 1930, en el Hospital Provincial se instaló el primer aparato de radioterapia profunda para el tratamiento de tumores; siendo el **Dr. D. Gabriel Arroya Sevilla** el pionero giennense e impulsor de esta especialidad en nuestra provincia. En 1935 se le adjudicó a dicho Hospital material radiactivo, concretamente radium dispuesto en agujas y tubos para su aplicación local; siendo así mismo el **Dr. Arroyo** pionero de la Braquiterapia en nuestra provincia. Su labor fue continuada ejemplarmente por su hijo el **Dr. D. Gabriel Arroyo Guerrero**, excelente profesional tanto en Radiodiagnóstico como en Radioterapia, maestro ilustre de muchas generaciones y persona de grandes valores humanos, al que muchos giennenses le estamos más que agradecidos.

Durante la década de los 60 la especialidad de Electrorradiología abarcaba el diagnós-

tico por imagen y la aplicación terapéutica; siendo a partir de 1978 cuando ambas se individualizan y la radioterapia pasa a denominarse Oncología Radioterápica, creándose también la especialidad de Oncología Médica para la aplicación de quimioterapia.

La Radioterapia en el siglo XXI

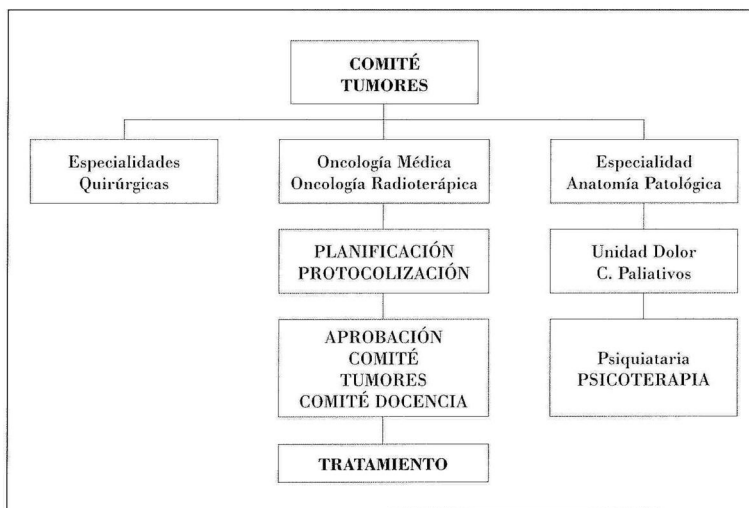
La Radioterapia se define como la exposición de una zona determinada del organismo a la acción de las radiaciones ionizantes provenientes de un isótopo radiactivo o de una fuente artificial generadora de rayos x.

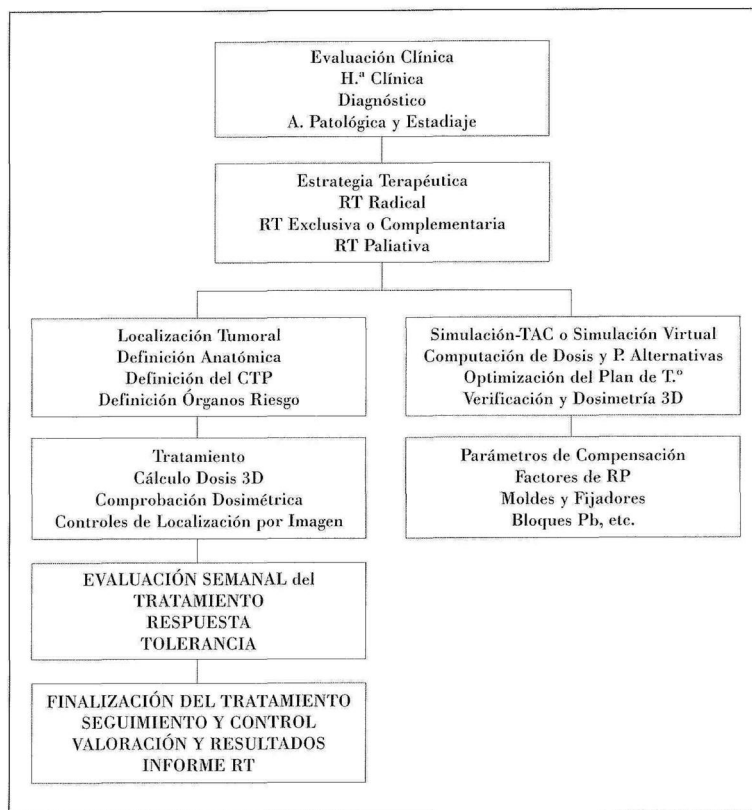
Las radiaciones ionizantes lesionan las células mediante la interacción con el ácido desoxirribonucleico (ADN), del núcleo, produciendo un bloqueo de la división celular. Al igual que los agentes citotóxicos empleados en la aplicación de quimioterapia, las radiaciones producen su efecto nocivo sobre las células tumorales, pero también este efecto se deja sentir sobre las células y tejidos sanos por lo que su aplicación debe ser muy selectiva y delimitada, y deberá te-

nerse en cuenta la localización exacta del tumor que va a ser irradiado para minimizar al máximo el efecto de la radiación sobre las estructuras o tejidos sanos, con el fin de no dañarlos.

La RT en la enfermedad oncológica, requiere un equilibrio absoluto entre las distintas especialidades a las que compete la atención, el estudio, la instauración del tratamiento más adecuado y el seguimiento correcto del paciente. Esta labor deberá permanecer exenta del protagonismo e individualismo y se fundamentará inexcusablemente en un trabajo de equipo que requiere: Unificación de criterios; Planificación y Protocolización. Con lo que accederemos a la elección de la estrategia terapéutica más idónea a fin de conseguir un tratamiento correcto y específico para cada caso en concreto.

La Comisión de Tumores, inicialmente considerada bajo la denominación de comisión de tejidos y tumores, engloba a las diferentes especialidades que intervienen en el tratamiento del cáncer: cirugía torácica, neurocirugía, neumología, ORL, cirugía má-





xilo-facial, anatomía patológica, unidad del dolor y tratamientos paliativos y la atención psicológica del paciente y familia mediante psicoterapia.
 La coordinación de las citadas especialidades a través de O. Médica y O. RT, será la base para la implantación de los protocolos de tratamiento adecuados y específicos para cada tipo de tumor.
 Junto a la actitud profesional, la aportación económica es imprescindible para poder desarrollar una actividad asistencial en

pro de la enfermedad, fijando como meta la Calidad de Vida que el paciente necesita y merece. De ahí la importancia de una Gestión Económico - Administrativa eficaz y en equilibrio coherente con la actitud y disposición profesional, que permita la adquisición y renovación de los medios técnicos necesarios para poder llevar a cabo nuestra labor asistencial.
 En Noviembre de 1998 se instauran en los hospitales con Servicio de O. RT. la **Comisión de Control y Garantía de Calidad,**

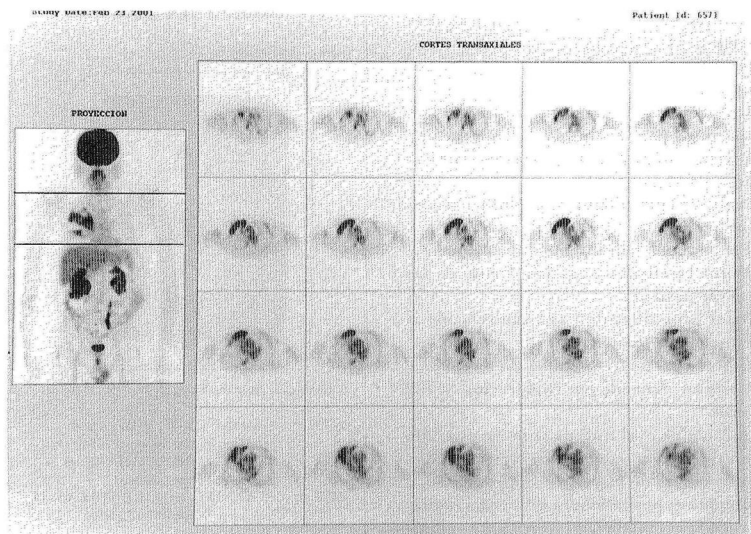
que con fecha 29 de Diciembre de 1999 se implantan de forma oficial por RD Ley y que se integran a la CE el 13 de Mayo del 2000. Tal vez éste haya sido el primer paso para que desde el punto de vista de la radioterapia, nuestro Hospital se sitúe en el lugar que necesita y los giennenses se merecen.

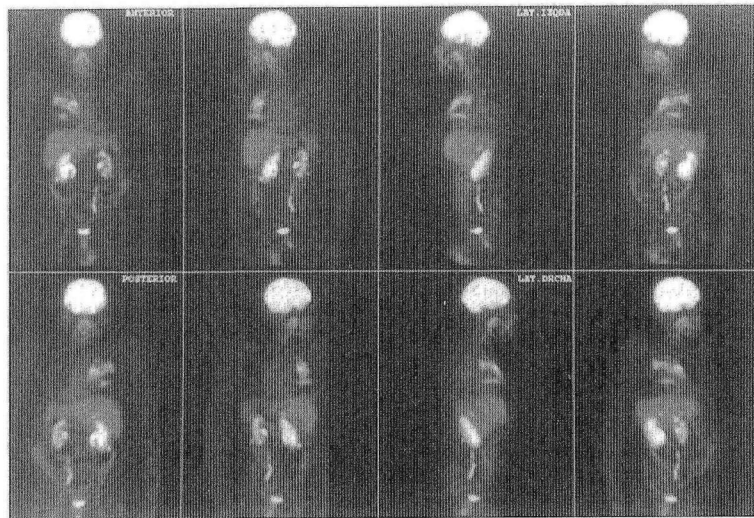
La Comisión de Control y Garantía de Calidad está integrada por la totalidad del personal cualificado por el CSN en la manipulación y manejo de fuentes radiactivas (Supervisores y Operadores) y a dicha comisión concierne la Planificación Sistemática y Protocolizada de las diferentes técnicas de irradiación individualizadas y especificadas para cada tipo de tratamiento. Una vez establecida la línea de actuación de las diferentes especialidades, siguiendo los protocolos de la Comisión de Tumores, procederemos al planteamiento de la estrategia terapéutica atendiendo a la intención y finalidad del tratamiento con radiaciones ionizantes: Rt exclusiva; radical; complementaria, concomitante; paliativa etc.

**Radiología convencional
Radiología por sustracción digital.**

**Ecografía
TAC
RMN
Gammagrafía.
SPECT
PET**

La localización y valoración del volumen tumoral a través de la imagen mediante las diferentes técnicas de diagnóstico, constituyen el método idóneo para establecer la situación, tamaño y delimitación de la zona a tratar. Concretamente el TAC y la RMN, son las más utilizadas, aunque los últimos avances con la aparición de la Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones (SPECT) y la Tomografía por Emisión de Positrones (PET) aportan interesantes beneficios en relación a la valoración dinámica y en el espacio tridimensional, respectivamente.





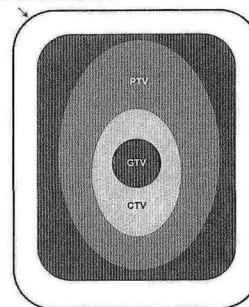
Entre las características más interesantes del PET para su utilización en la localización y valoración de la extensión tumoral, destacan:

- Emisión de partículas α de energía superior a 511 KeV.
- Utilización de isótopos de baja actividad, específicos para cada tipo de exploración.
- Permite múltiples exploraciones por órganos y sistemas.
- Incluye la posibilidad de exploración corporal completa.
- Proporciona imágenes tridimensionales.
- Mejor resolución espacial, 4 mm, en las tres dimensiones.
- Valor pronóstico de 1 año con relación al resto de exploraciones.
- Coste / Beneficio = Financiación rentable.
- Coste aproximado por exploración = 720 Euros.

En Andalucía, el SAS dispone de este tipo de exploración, concretamente en Sevilla, desde el mes de marzo del año en curso, y aunque sus posibilidades están algo limitadas en la actualidad, en breve y tras la ins-

Representación de los Volúmenes Diana

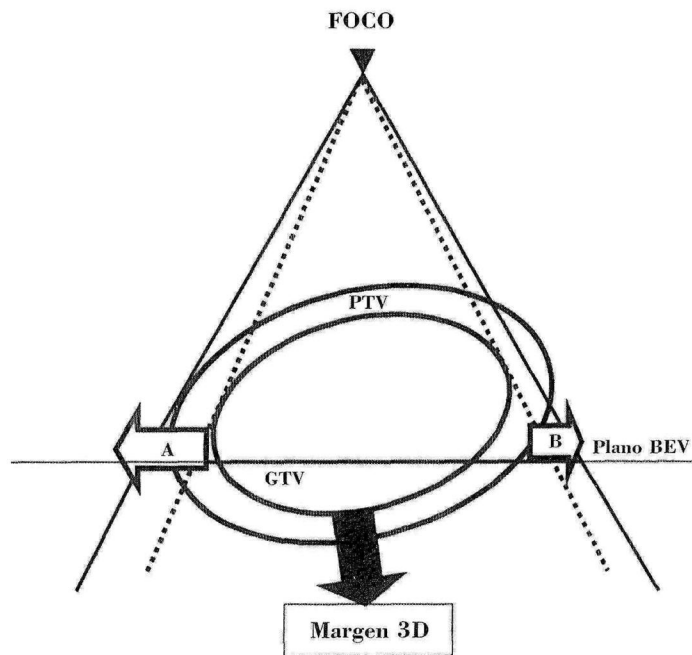
Volumen Irradiado



Referencia Zimmermann y Molls, 1998, ICRU 50

- CTV = GROSS TUMOR VOLUME =**
Volumen grueso o macroscópico.
- CTV = CLINIC TARGET VOLUME =**
Volumen Diana Clínico.
- PTV = PLANNING TARGET VOLUME =**
Volumen Diana Planificado.

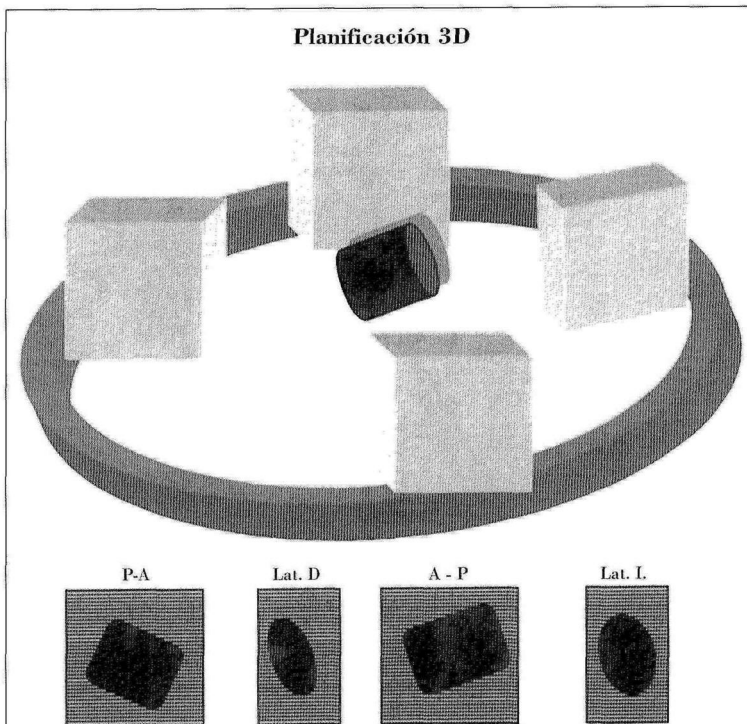
A través de las imágenes obtenidas del TAC, RMN, PET, procederemos a la reconstrucción anatómica de la zona a tratar, que deberá corresponderse con las imágenes localizadas por medio de la simulación, que así mismo se localizarán mediante la realización de las radiografías necesarias en las diferentes proyecciones y planos anatómicos del propio paciente. Ello constituye el proceso de Planificación y dosimetría. Proceso que ha evolucionado notablemente, pasando del sistema bidimensional (2D y 2,5 D), al tridimensional (3D) basado en la simulación virtual, que nos proporciona los datos e imágenes precisas en tiempo real.



A = Margen añadido mediante BEV (demasiado amplio)
B = Margen añadido mediante BEV (demasiado pequeño)

La planificación 2D se ha ido mejorando utilizando la perspectiva BEV («Beam Eye's Views»), perspectiva ocular del haz de irradiación; pero debido a la divergencia del haz, la proyección bidimensional del GTV sobre el plano BEV puede dar lugar a márgenes asimétricos, que pueden resultar demasiado amplios (A) o demasiado pequeños (B) comparados con las proyecciones del PTV en 3D. La planificación 2,5 D mediante la suma de varios cortes anatómicos por TAC, van delimitando el GTV y proporcionan una dosimetría más exacta con menor irradiación de tejidos en vecindad pero sin llegar a la exactitud de la 3D.

Planificación 3D



60

Como la planificación 3D se fundamenta en la reconstrucción volumétrica de las estructuras corporales sometidas a una exploración de TAC y puesto que ésta aporta la densidad electrónica de los tejidos, necesaria para el cálculo exacto de la distribución de la dosis, será el TAC el elemento básico para la planificación.

El segundo elemento imprescindible lo constituye una estación gráfica computerizada capaz de acceder a la reproducción de cualquier tipo de órgano o estructura a partir de los datos que nos aporta el TAC: órganos críticos, tejido óseo, tumor, tejidos sanos etc. Proceso conocido actualmente como simulación virtual y que tiene la ventaja de no precisar de la presencia del paciente sino que la simulación parte de la imagen elegida y guardada en el sistema de informatización (ordenador) y de aquí pasará al sistema de cálculo computerizado de distribución de dosis dependiente del radiofísico.

Pionero de este sistema en España y parte de Europa es el Dr. Petschen, en el Hospital «La Fe» de Valencia, dónde disponen además de un sistema de verificación instalado en el Acelerador, basado en la adaptación de una pantalla de detección formada por varias cámaras de ionización conectadas con fotodiodos que permiten a través de una cámara de vídeo transmitir la imagen al ordenador para su digitalización y manipulación. A este sistema se le conoce como Imagen Portal Electrónica.

talación de un generador de isótopos (Ciclotrón) aprobado por el CSN el pasado 11 de Mayo, su rendimiento estará al máximo y será asequible a la totalidad de los hospitales de nuestra autonomía.

La simulación sobre el paciente será el paso siguiente para lograr la localización del Volumen Blanco, delimitándolo de los órganos de riesgo y configurando las puertas de entrada del haz de irradiación. Para ello hemos de considerar: El volumen anatómico o volumen grosero (GTV); el tumor clínicamente evidente con un margen de seguridad que cubra la posible diseminación microscópica (CTV) o volumen diana clínico. El CTV debe recibir el 100% de la dosis de radiación; el volumen diana planificado (PTV) engloba al CTV con un margen de seguridad suficiente para cubrir los movimientos del órgano a tratar.

La optimización de la planificación tridimensional permite la utilización de múltiples campos convergentes en el VB, adaptados a la forma que éste tiene en cada una de las proyecciones. Se trata concretamente de la técnica más utilizada actualmente en el tratamiento y conocida como **Radioterapia Conformada**.

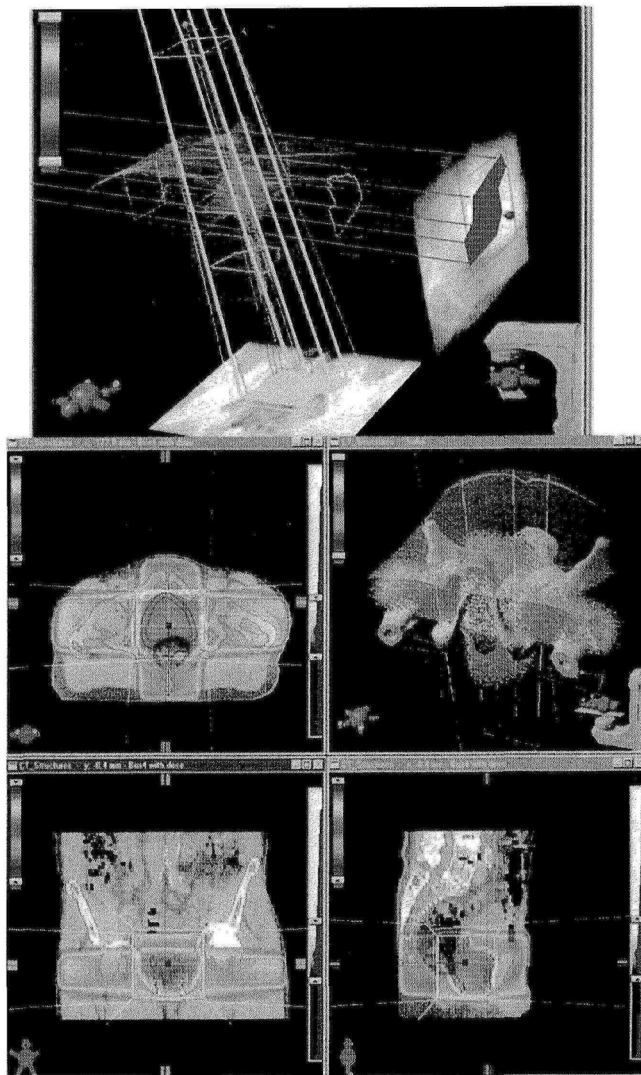
La Radioterapia Conformada ha ido evolucionando, partiendo desde una técnica de campos opuestos en la que se irradia además del tumor o VB una gran cantidad de tejido sano, a la aplicación de 4 campos de tratamiento que reduce a un volumen cuboideo. Si a ello se aplica la técnica de movimiento, dicho volumen se reduce aún más; quedando delimitado a un volumen cilíndrico, que finalmente se verá adaptado a la forma real del volumen blanco al aplicar la técnica movimiento conocida como **radioterapia dinámica conformada**.

Desde principios de siglo la radioterapia se aplica con técnicas de teleterapia, que utiliza un haz de fotones para irradiar el tumor desde fuera del organismo. Como alternativa para localizaciones específicas, se emplea la braquiterapia, que consiste en la implantación de una fuente de radiación en

una cavidad corporal o en el interior del tumor.

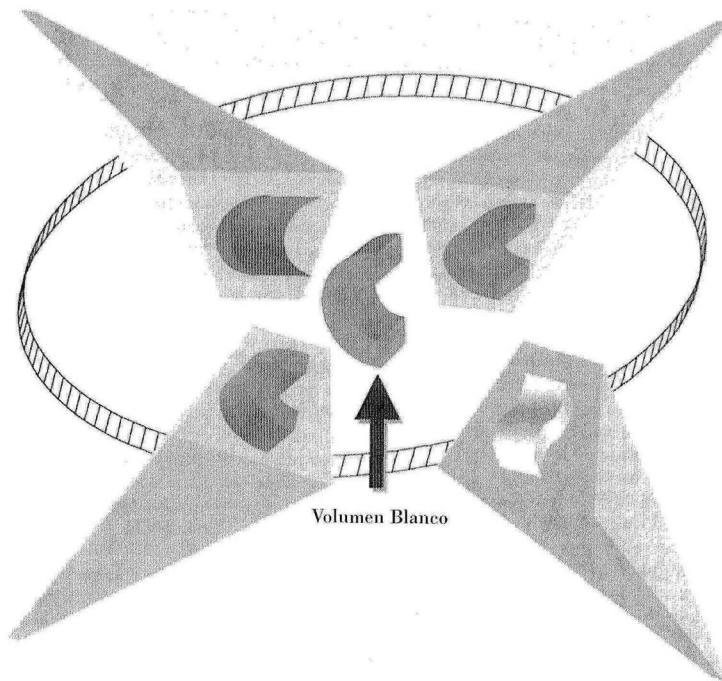
La teleterapia precisa del uso de fuentes de ortovoltaje o kilovoltaje de baja energía, o bien de fuentes de megavoltaje. La radiación de baja energía, (50 - 100 Kv.) se utiliza para el tratamiento de tumores malignos localizados a nivel dérmico (**Radioterapia Superficial**); mediante la generación de haces de R. X. creados por tubos convencionales. Para eliminar los fotones superficiales que carecen de efecto terapéutico y producen una dosificación excesiva en superficie, se aplican filtros de Aluminio entre 0,5 y 2 mm y se usa a una distancia Foco/Piel entre 2 y 12 cm; siendo muy eficaz en el tratamiento de Ca. Epidermoides de piel (Epiteliomas Baso y Espinocelulares). La radiación con energía de 250 y 300 Kv, conocida en su tiempo, como **radioterapia profunda**, fue quedando progresivamente en desuso tras la aparición de la Telecobaltoterapia y los Aceleradores Lineales.

Las unidades de Co - 60 introducidas en la década de los 50, sustituyeron a la radioterapia convencional y han permitido un importante avance, al disponer por primera vez de un haz de radiación externa (**Telecobaltoterapia**) con energía suficientemente eficaz para el tratamiento de tumores profundos y aún continúan desempeñando un papel importante en la radioterapia actual. La telecobaltoterapia utiliza una fuente radiactiva o radionúclido de Co-60, introducida en un cabezal constituido por tungsteno (material altamente absorbible), cuya forma inicial esférica, recordaba la de una bomba de las utilizadas en la II Guerra Mundial, de ahí su denominación, mal llamada, «bomba de cobalto». La fuente radiactiva emite radiación gamma, generando haces de fotones de energía comprendida entre 1,17 y 1,33 MeV. Dichos haces son regulados en su salida a través de un colimador que permite adaptar el tamaño del campo a la zona o área que deseamos tratar. Así mismo, los diferentes desplazamientos de la mesa de tratamiento sobre la que se co-



Planificación y Evaluación 3D (cortesía de Varian Medical Systems).

Copyright © 2007 by Elsevier Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier Inc.



Volumen Blanco

loca al paciente y la posibilidad de giro del cabezal en ángulo completo de 360° , nos permiten dirigir el haz de irradiación, sobre la zona o área dónde esté localizado el tumor, bien fijando las coordenadas y el ángulo de incidencia (campos fijos) o de forma móvil (RT de movimiento) programando un movimiento de rotación o giro continuo sobre el punto central del VB (isocentro) y adaptando el ángulo de giro a la amplitud deseada (Arcoterapia). Esta técnica permite simultáneamente la irradiación continua o bien por segmentos (skip). Concretamente y desde hace catorce años, venimos utilizándola con carácter radical y fines curativos, en tumores de laringe localizados a nivel de glotis y en estadio inicial (T1 y T2), siguiendo un programa acorde con el Servicio ORL del Hospital

Provincial (Dr. Rosell). Los resultados con respuestas y remisión completa del 100%, ofrecen de por sí, un pronóstico alentador; máxime cuando esta terapia de movimiento es asequible y mejorable con la utilización de los aceleradores lineales de nueva generación que pasarán a sustituir a la TCT, a nivel de la totalidad de los países que integran la CE en el plazo aproximado de cinco años.

La **Braquiterapia**, conocida también como Curiterapia, en honor a sus descubridores, constituye otra de las técnicas de tratamiento que han evolucionado notablemente a lo largo de los años; utilizándose normalmente en combinación con la radioterapia externa, la cirugía o la quimioterapia. Los resultados de su aplicación son altamente positivos en los estadios iniciales de procesos

neoplásicos localizados en labio y lengua. Su aplicación conjuntamente con la radioterapia externa ofrecen resultados alentadores en cáncer de cérvix, vagina, esófago, próstata y recto, así como en tumores de tejidos blandos, concretamente en los sarcomas. Para su aplicación se utilizan preferentemente, fuentes de Cesio - 137 e Iridio - 192, aunque también suelen utilizarse el Oro - 198 y el Yodo - 125 que se implantan según la localización y extensión de las lesiones. Diferentes son las formas de aplicación de Braquiterapia, de acuerdo a la localización inicial del tumor y tipo de implante:

Intersticial (mucosa bucal, lengua, amígdala, sarcoma de partes blandas, entre otros)
Intracavitaria por medio de aplicadores diseñados específicamente para la forma anatómica del órgano de localización (vagina, recto, cérvix uterino, nasales).

Intraluminal a través de fuentes colocadas en catéteres que se introducen en órganos o vías huecas (esófago, vasos sanguíneos, endobronquiales, vías biliares).

En cuanto a las características principales en su aplicación, la utilización de nuevos isótopos y la innovación de los métodos técnicos existentes, han dado paso a nuevos y recientes aspectos organizativos en la aplicación de esta modalidad de tratamiento.

Los sistemas de braquiterapia de carga diferida que permiten la movilización automática del isótopo aplicable (Cesio - 137 o Iridio - 192) focalizan el haz de irradiación, delimitando el volumen tumoral y evitando la afectación de tejidos sanos. Así mismo la programación del tiempo de irradiación de manera automática hace que se reduzca la exposición innecesaria del personal encargado del tratamiento.

Las dosis deseadas para el tratamiento dependen del método de aplicación elegido, alcanzando actualmente Dt de 90 Gy en algunos casos:

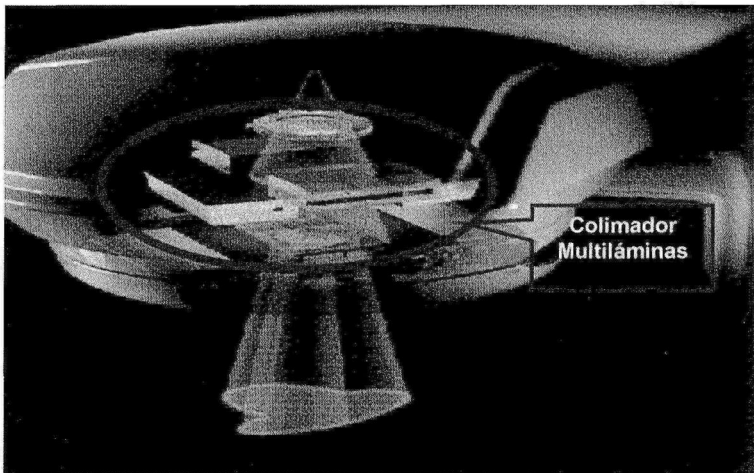
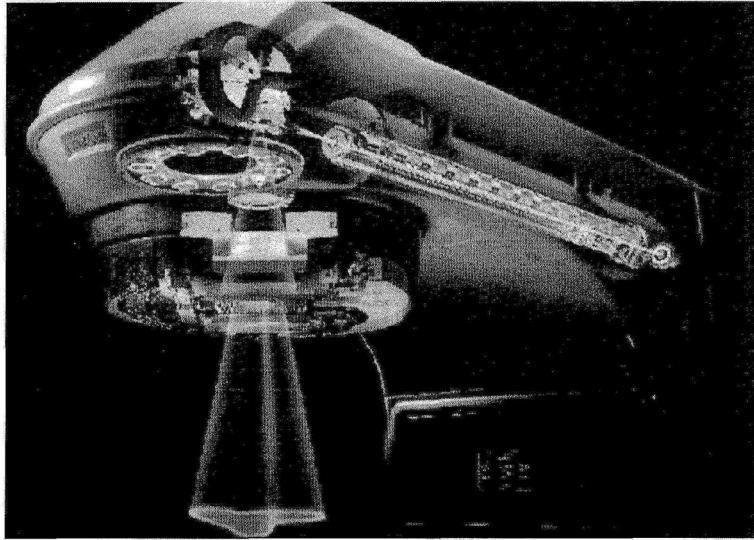
1. Braquiterapia LDR. (Baja tasa de dosis) por medio de la cual, la fuente que se implanta permite administrar una dosis entre 40 y 60 cGy por hora durante varios días.

2. Braquiterapia PDR. (Tasa pulsada de dosis). En la que la fuente administra una dosis entre 250 a 300 cGy en tiempo aproximado de 10 a 15 minutos por cada hora, durante varios días.

3. Braquiterapia HDR. (Alta tasa de dosis). Con la que se puede aplicar una dosis escalonada de 100 cGy por minuto. Técnica ésta la más favorable desde mi punto de vista, dado que permite aplicarla en dos o tres sesiones por tratamiento cuya duración es de unos 10 minutos por sesión, y por tanto la rentabilidad es mayor dado que la necesidad de personal es mínima y por otra parte se evita que el paciente haya de permanecer aislado durante varios días con los consiguientes problemas psicológicos que ello conlleva. El inconveniente aún estriba en el efecto radiobiológico que puede originarse a medio y largo plazo, pero los estudios y mejoras que de este tipo de tratamiento se vienen realizando, así como los resultados obtenidos en las diferentes localizaciones de su aplicación, permiten que sea la técnica idónea dentro de la braquiterapia. Bien con carácter de tratamiento exclusivo, cuando se trata de tumores de pequeño tamaño (Estadios iniciales T1 y T2) < de 4 cm, o como tratamiento complementario a la cirugía y/o radioterapia externa.

En tumores de labio que no afecten a la comisura, la aplicación mediante guías rígidas o agujas hipodérmicas permiten aplicar dosis de 5500 a 6500 cGy con carácter exclusivo, consiguiendo una tasa del 100% de control locorregional. La misma técnica es asequible a tumores de pene, aunque al ser la respuesta completa de un 75% aproximadamente, es conveniente suplir el tratamiento con radioterapia externa sobre las áreas ganglionares.

En tumores localizados sobre zonas anatómicas más complejas (párpados, nariz, surco nasogeniano, región periorbitaria etc.) la aplicación mediante guías flexibles es la más indicada, siendo los resultados del 100% de respuesta completa para tumores de menos



La colimación multilaminar permite adaptar el haz de radiación a la forma geométrica del volumen blanco que deseamos irradiar, evitando la irradiación innecesaria de tejidos sanos y respetando los órganos críticos adyacentes.

(Imágenes cedidas por cortesía de Varian Medical Systems)

de 2 cm y del 90% para tumores entre 2 y 4 cm.

Tumores de vagina y cérvix uterino, el tratamiento mediante aplicadores intrauterinos y moldes vaginales constituye otra de las técnicas en uso, complementada con la radioterapia externa. La localización de estructuras anatómicas próximas (vejiga, recto) obligan a definir el volumen tumoral por las dosis totales (6000 cGy) aplicadas con ambos tratamientos, especificando las dosis recibidas en órganos críticos. Aquí los resultados en estadios I y IIa de cérvix, alcanzan el 95% de respuesta completa. Para estadios IIb y III las respuestas disminuyen notablemente y el porcentaje de recidivas es mayor, por lo que la cirugía y la radioterapia externa son las indicadas.

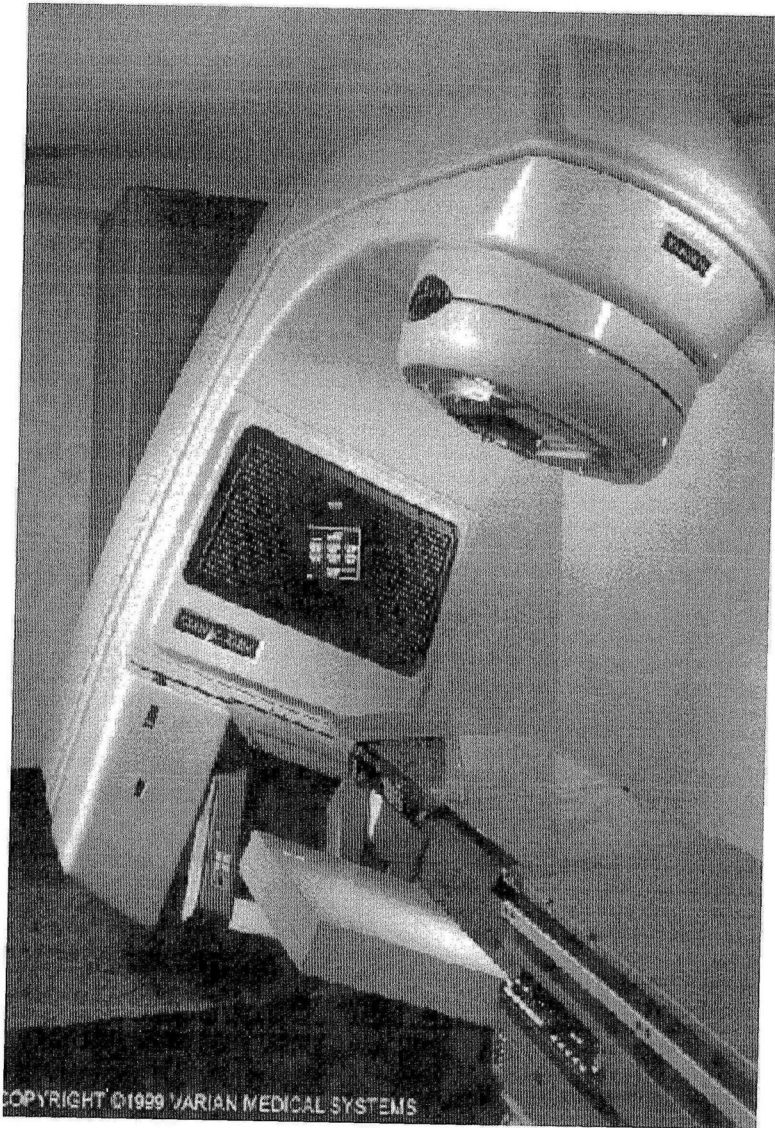
En tumores de esófago, la intervención quirúrgica es el tratamiento de elección, aunque sólo un 40% tras el primer diagnóstico son asequibles a la resección quirúrgica. No obstante el pronóstico es de los más desalentadores, dado que la supervivencia a los 5 años sólo es de un 5%. La mayor incidencia en edades avanzadas, la presencia de hipertensión arterial, insuficiencia cardiaca y EPOC reducen notablemente las posibilidades quirúrgicas y hacen que el tratamiento con RTE (40 - 45 Gy) y Braquiterapia (10 Gy HDR) sea el de elección en estos casos, mejorando notablemente el síntoma principal: la disfagia, y la media de supervivencia puede alcanzar los dos años. En los estadios avanzados (IIb y III) la RTE, Braquiterapia y Quimioterapia (Cis - platino y 5 Fluoracilo), constituyen actualmente el método más idóneo; consiguiéndose respuestas de supervivencia próximas al 30 - 35% a los 18 meses de la finalización del tratamiento.

En lo que respecta a tumores endobronquiales, aún no se han obtenido resultados suficientemente valorables entre la aplicación de RTE exclusiva y RTE conjuntamente con Braquiterapia.

Los **Aceleradores Lineales** utilizan tensiones alternas elevadas para impulsar partículas a lo largo de una línea recta. Las par-

tículas atraviesan una serie de tubos metálicos situados dentro de un cilindro en el que previamente se ha hecho el vacío. La tensión alterna se sincroniza para que la partícula sea impulsada hacia delante cada vez que atraviesa el espacio o hueco existente entre dos tubos o segmentos metálicos. Desde la creación del primer acelerador lineal a finales de la década 1920, conocido por «linac», hasta la actualidad, la tecnología de estos aparatos ha evolucionado notablemente. Se trata de AL que se adaptan mucho mejor a la radioterapia conformada basada, como vimos anteriormente, en la optimización de la planificación 3D merced a la posibilidad de aplicar una técnica de terapia dinámica conformada que permite adaptar el volumen de tratamiento a la forma real del volumen blanco y modular la intensidad del haz. de irradiación. Este tipo de AL permite un sistema de barrido variable (multienergético) mediante energías comprendidas entre 6 y 32 MeV que se controlan a través de ordenador y por otra parte la disponibilidad de un colimador multilaminar de uso dinámico obtiene la conformación exacta del volumen blanco en cada ángulo de incidencia a la vez que modula y modifica el tiempo de exposición en cada apertura elemental programada. De ahí la denominación actual de estos aceleradores: **aceleradores lineales multienergéticos y multilaminares**, con posibilidad de irradiación mediante fotones y electrones.

Con esta técnica se consigue un aumento de un 10 a un 20% de dosis sobre las conseguidas con telecobaltoterapia; siendo mucho menor la irradiación de estructuras o tejidos sanos considerados como órganos de riesgo. Si hasta ahora las dosis máximas aplicables oscilaban alrededor de los 6000 - 7000 cGy, este tipo de terapia dinámica y conformada permite acceder a la aplicación de dosis hasta los 8000 - 8200 cGy e incluso más, dependiendo de las localizaciones: Es así como en el tumor hepático, limitado pero no asequible quirúrgicamente, se pueden aplicar hasta 7200 cGy. En el cáncer de pul-



món puede aplicarse una dosis de 6500 cGy sobre un volumen amplio y alcanzar los 8400 cGy sobre pequeños restos tumorales. En tumores del sistema nervioso central, las expectativas son bastante prometedoras y la dosis inicial en escalada, comenzando la irradiación sobre el tumor con un margen de seguridad de 2,5 cm, que autoriza una dosis de 5000 cGy, puede incrementarse hasta los 8000 cGy reduciendo progresivamente el margen de seguridad hasta 0,5 cm. También el cáncer de próstata se beneficia notablemente de esta tecnología, consiguiéndose dosis próximas a los 8000 cGy.

La **Radioterapia Intraoperatoria** ya iniciada con la radioterapia de ortovoltaje a principios del pasado siglo, constituye actualmente otro de los métodos idóneos con importantes perspectivas de futuro en el tratamiento de tumores cerebrales y abdominales (tumores del SNC como los astrocitomas y glioblastomas, tumores de páncreas, colon, vejiga, hígado, vesícula biliar) e incluso sarcomas de partes blandas y tumores óseos. Se trata de irradiar durante el acto quirúrgico restos tumorales no reseables o bien el lecho quirúrgico ante la sospecha de restos microscópicos que por las características de agresividad del tumor puedan inducir a la rápida reproducción del mismo. He de aclarar que este tipo de radioterapia es un complemento de la radioterapia externa. Se requiere que el quirófano esté próximo a la instalación de radioterapia con el fin de evitar un tiempo prolongado del acto quirúrgico y del tiempo de traslado del paciente a la zona de radiación bajo los efectos de la anestesia general, y de otra parte controlar lo mejor posible la asepsia, evitando la aparición de procesos infecciosos interrecurrentes.

El volumen blanco se delimita al lecho quirúrgico mediante la colocación en el cabezal del AL de localizadores, esterilizados previamente, que se aplican sobre la superficie de la zona de irradiación. Conjuntamente la irradiación mediante electrones de energía adaptable según la profundidad de la lesión que deseamos tratar, evitará la

afectación en vecindad y respetará los órganos de riesgo. El tratamiento se aplica en una sola sesión durante el acto quirúrgico, con dosis que oscilan entre los 10 y 30 Gy, dependiendo de la localización (10 a 20 Gy en tumores de recto; 20 Gy en tumores de cabeza y cuello; 10 a 25 Gy en tumores ginecológicos; 15 a 20 Gy en tumores de páncreas y vías biliares etc.) completándose posteriormente con RE a dosis entre los 40 - 50 Gy. De esta forma conseguimos una dosis total próxima a los 80 Gy.

De esta forma conseguimos aumentar notablemente el control locorregional de la enfermedad y disminuir el porcentaje de aparición de recidivas; evitándose al mismo tiempo las complicaciones y efectos secundarios sobre órganos y tejidos sanos. De ahí la importancia actual de la RIO como método complementario de la Radioterapia externa. en el tratamiento oncológico.

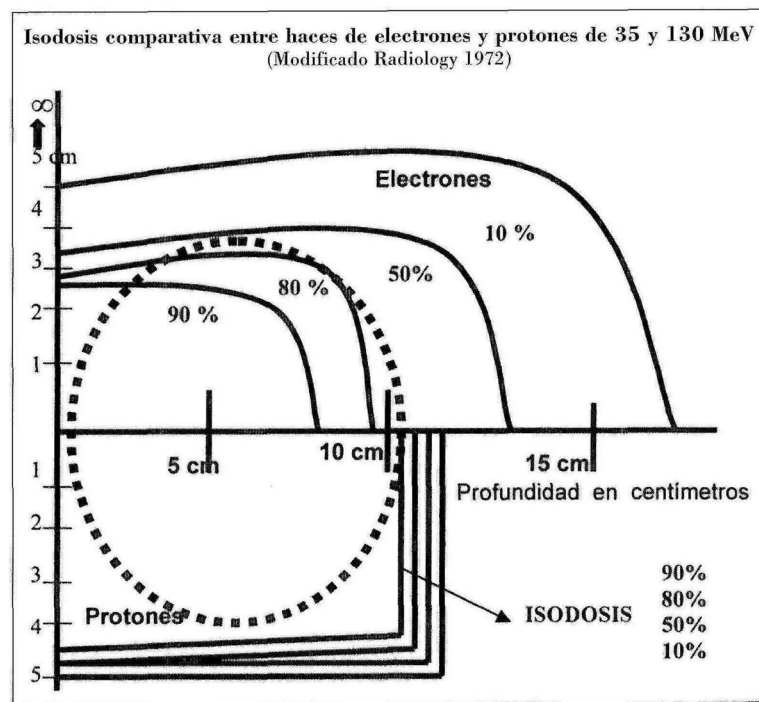
Nuevas tecnologías, actualmente dentro del campo de la investigación constituyen a no muy largo plazo un futuro prometedor en la mejora y efectividad del tratamiento oncológico mediante la radioterapia.

Concretamente la terapéutica con neutrones, protones, mesones π (piones), y núcleos acelerados de carbono, helio o nitrógeno, pueden ofrecer resultados prometedores en tumores histológicamente resistentes a la terapia actual con fotones y electrones.

La terapia con **neutrones** iniciada hacia 1938 por Stone, en la Universidad de California, aunque abandonada posteriormente como consecuencia de los efectos nocivos y secundarios a su aplicación, vuelve a tomar auge en la década de los 80 y actualmente es utilizada en unos 10 países de EE.UU., Europa y Japón, aunque con carácter aún de investigación. Demostrándose su efectividad, en los ensayos llevados a cabo, sobre tumores específicos, especialmente radiorresistentes, de crecimiento lento y considerados como localmente avanzados y por tanto sin las posibilidades quirúrgicas: adenocarcinomas bien diferenciados de próstata, glándulas salivares y senos paranasales, sarcomas de partes blandas; osteosarcomas y melanomas.

No obstante y dada la alta nocividad y morbilidad de este tipo de irradiación, el tratamiento se hace efectivo sobre el tumor localizado, siendo necesaria la aplicación de radioterapia de menor energía sobre los territorios o áreas ganglionares. Por ello en la actualidad y considerando la alta letalidad celular de los neutrones, los trabajos de investigación van dirigidos a mejorar esta técnica, mediante la localización tumoral previa con la aplicación de determinados compuestos borados (captura neutrónica del boro), ya que el boro tiene la particularidad, al ser administrado en el organismo, de depositarse y concentrarse sobre el tumor a concentraciones mucho más elevadas que en los tejidos sanos e incluso que

en el sistema sanguíneo. Concretamente tumores como el melanoma y los glioblastoma, especialmente este último; son capaces de acumular altas concentraciones de boro y al irradiar posteriormente con neutrones de baja energía, éstos son capturados por los átomos de boro depositados en las células tumorales dando lugar a partículas alfa de alta energía y a iones litio. Las partículas alfa, de escaso recorrido, quedarán atrapadas en el propio tumor, creando una elevada dosis de irradiación y energía que producirán un efecto letal sobre las células neoplásicas; evitando dañar las estructuras de tejidos sanos vecinos. Frente a las ventajas que tienen sobre las radiaciones X y gamma (menor oxígeno - dependencia,



menor capacidad de regeneración celular del efecto o daño subletal y la elevada capacidad de ionización), se plantean problemas de índole técnica y económica que limitan su utilización: elevado coste, versatilidad de los generadores, penetración limitada etc. Motivos que justifican en la actualidad, su uso limitado sólo a trabajos de investigación, pero que no descartan su aplicación clínica en un futuro no muy lejano.

La utilización de partículas pesadas y concretamente los **protones**, constituyen otra de las técnicas actuales, en fase de investigación, que pueden ofrecer resultados esperanzadores por la particularidad que tienen de poder concentrarse a una determinada profundidad dependiendo de la energía que les proporcionemos. Por otra parte, la capacidad de frenado que sobre ellos ejercen los electrones del medio o tejidos que atraviesan, nos permiten regular la profundidad a la que deseamos que se produzca dicho enlentecimiento o frenado, de manera que la máxima cantidad de energía liberada se deposite sobre la zona que deseamos tratar, respetando los tejidos sanos adyacentes.

La profundidad de la dosis máxima («pico de Bragg») se adapta a la energía del haz de radiación para abarcar la totalidad del volumen blanco (representado por el círculo punteado). Es así como conseguiremos, dependiendo de la energía que apliquemos a los protones, depositar la dosis máxima a la profundidad en que se localiza el tumor y que se corresponde con la zona de enlentecimiento o frenado; en tanto que por delante de éste y al ser la velocidad de los protones muy elevada, la dosis será muy baja, mientras que en la zona inmediatamente posterior la dosis será prácticamente inapreciable, al haberse producido la detención o frenado completo de los protones.

La primera experiencia con resultados un tanto alentadores se llevo a cabo en el sincrociclotrón instalado en la Universidad de Harvard (Cambridge) a mediados de la década de los sesenta. Este sistema de aceleración está formado por un tubo en forma de anillo por el que se desplazan las partí-

culas (protones) y está rodeado por varios electroimanes que hacen que éstas se desplacen por el centro del anillo. Los protones entran en el anillo después de haber sido acelerados a varios millones de electrón-voltios y en el interior del anillo vuelven a ser acelerados en varios puntos y cada vez que describen un círculo completo alrededor del acelerador. Para mantener los protones en una órbita constante, las intensidades de los electroimanes se aumentan a medida que estas partículas ganan energía y en escasos segundos alcanzan energías superiores a 1 GeV y son expulsadas y lanzadas contra blancos que producen partículas elementales al ser golpeados por los protones acelerados.

En la actualidad alrededor de veinte centros de investigación utilizan este sistema en el tratamiento de tumores con protones, destacando desde la década de los setenta el de Dubna (Rusia) que utiliza energías superiores a 700 MeV, Tsukuba en Japón que utiliza protones y fotones de 250 MeV, Faure en Sudáfrica, Niza y Orsay en Francia, Clatterbridge en Inglaterra entre otros. El más potente conocido como K-1200 instalado en la Universidad Estatal de Michigan (E. Unidos) capaz de acelerar partículas con energía cercana a los 8 GeV empezó a funcionar en 1988. Posteriormente, en 1989 se consiguen energías entre 500 GeV y 1TeV en dos sincrociclotrones, los más potentes del mundo: El Farmilab situado en Batavia (EE.UU) y el instalado en Europa en el Consejo Europeo de Investigación Nuclear (CERN) con sede en Meyrin (Ginebra). En todos ellos se vienen tratando tumores oculares (melanomas de coroides), condrosarcomas y meningiomas, tumores de próstata etc. con respuestas y control locorregional superiores al 80% y una media de supervivencia que supera los 5 años; demostrándose la alta efectividad de estas técnicas frente a la radioterapia convencional.

Recientemente, en el inicio de la década de los 90, a los aceleradores de partículas se les añade un anillo de almacenamiento, convirtiéndolos en colisionadores, capaces de

acelerar dos conjuntos de partículas de cargas opuestas: electrones y **positrones**. Se les denomina Large Electrón - Positrón Collider (**LEP**). Estas partículas son aceleradas y posteriormente almacenadas en dichos anillos, dónde circulan en sentidos opuestos y sometidas a las energías necesarias, se las hace chocar frontalmente para medir y valorar los efectos producidos en dicho choque. El problema de estas altas tecnologías son su elevado coste y el requerimiento de grandes espacios libres de las instalaciones. Concretamente el LEP de la CERN dispone de un anillo de almacenamiento que alcanzan una longitud de 27 Km. En Waxahatche del estado de Texas (EE.UU.), el proyecto de instalación de un colisionador con anillo de almacenamiento de 87 km, conocido como SSC (Supercolisionador-Superconductor) iniciado en 1989 con un presupuesto de 11.000 millones de dólares, fue cancelado por el Congreso de Estados Unidos en 1993 debido al elevado coste.

La Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) cuya finalidad es la investigación de la estructura de la materia y los efectos inmediatos producidos tras el fenómeno conocido como Big Bang, abarca una serie de programas de investigación cuya base física avala el conocimiento científico del origen del Universo y podrán aplicarse, en un futuro no muy lejano, al campo de las radiaciones y su adaptación a la Medicina. Este proyecto ampliado en 1995 a veinte países, incluida España; con un presupuesto anual de 650.000.000 de Euros, incluye la ampliación del LEP para dar cabida al colisionador de **hadrones (LHC)** cuya fase de finalización está prevista para la primera década del siglo XXI.

Así mismo la técnica de irradiación con **mesones pi (π)** conocidos como piones, también en fase de investigación, se está aplicando en Europa (Suiza e Inglaterra entre otros países), sobre tumores sólidos de gran tamaño (sarcomas óseos). Los resultados ciertamente alentadores, amplían el optimismo en el campo terapéutico del cáncer, en un futuro no muy lejano.

Conclusión

Desde el descubrimiento de los R.X. en 1895, el estudio de las radiaciones y el efecto que las mismas ejercen sobre el organismo humano, han supuesto un estímulo continuado en el campo de la investigación con la finalidad de ampliar al máximo los conocimientos físicos para adaptarlos de forma progresiva al tratamiento de la enfermedad oncológica.

Junto con las demás especialidades (cirugía, oncología, anatomía patológica, tratamiento del dolor etc.), la Radioterapia constituye uno de los medios de tratamiento que aportan importantes soluciones a una enfermedad considerada actualmente como la segunda causa de mortalidad en la población mundial. Aunque en determinados momentos o etapas se consideró alcanzada la optimización máxima de esta especialidad terapéutica, su progreso continúa y continuará evolucionando; constituyendo un pilar básico en el tratamiento multidisciplinario del cáncer, ya sea con fines radicales curativos, complementarios, con carácter profilácticos, o bien paliativos.

No obstante la diversidad de técnicas y medios disponibles que abarca la radioterapia tienen ciertas limitaciones, condicionadas bien por las características histológicas de las células tumorales, bien por el excesivo volumen o extensión del tumor o bien por el déficit de oxígeno de ciertos grupos celulares. En la actualidad, la hipoxia celular o déficit de O₂ constituye un factor importante a tener en cuenta como consecuencia de la capacidad de reproducción de las células tumorales afectas por la falta de oxigenación. Estos grupos celulares conocidos como fracción hipóxica, constituyen un factor de riesgo importante con relación a la reproducción o recidiva y está demostrado y valorado entre un 10 y un 20%, pero que en ciertos tumores puede sobrepasar el 60% de riesgo de recidivas, dada la capacidad de proliferación de la fracción hipóxica, máxime cuando las células pueden reactivar su capacidad de mitosis incluso antes de finalizar un tratamiento. De ahí que la radioterapia

controle actualmente las estirpes celulares más radiosensibles y aquellas otras de mediana radiosensibilidad siempre que el volumen tumoral no sea excesivo; quedando muy limitada a tumores considerados radiorresistentes: tumores cerebrales de alto grado (Astrocitomas, Gliomas, Oligodendrogliomas, Glioblastomas, etc.), sarcomas y melanomas entre los más frecuentes.

Actualmente el empleo de sustancias con propiedades radiosensibilizantes, vasodilatadoras, hiperoxigenantes y reepitelizantes como temozolamida (SCH 52365), amifostina, hidroxil-urea, epoetinum alfa y ácido hialurónico entre otros, concomitantemente a la aplicación de radioterapia, aportan resultados prometedores. Los trabajos al respecto, en fase de investigación I y II, en la que nuestro Servicio participa en grupos de ensayo junto con los demás hospitales de Andalucía y del resto de nuestro país, vienen dando buenos resultados que esperamos progresen y alcancen el efecto deseado para su protocolización y sistematización definitivas.

Por todo lo expuesto, para el estudio y tratamiento de la enfermedad oncológica, será requisito imprescindible y necesario cumplir exhaustivamente con una serie de normativas preestablecidas que en conjunto constituyen el Programa Asistencial en la enfermedad oncológica:

Trabajo en equipo = Unificación de criterios.
Coordinación = Planificación.
Actualización = Nuevas técnicas.
Investigación = Origen de la enfermedad.
Cumpliendo con estas normativas conseguiremos mejorar de forma progresiva la Calidad Asistencial y con ello la meta final perseguida, que es la de alcanzar el mejor beneficio para el enfermo y su entorno: La CALIDAD de VIDA del paciente oncológico.

Agradecimiento

Al finalizar esta exposición deseo expresar mi felicitación al Instituto de Estudios Científicos en su 50 Aniversario, en las personas de los doctores José María Sillero y José Antonio Rosell.

Humildemente me permito animarles para continuar en la misma línea, manteniendo su independencia y autonomía. Demostrando así sus valores humanos, su profesionalidad y ejemplaridad—«in crescendo»— a las puertas de un nuevo siglo: El siglo XXI. ◀

M. Ángel Casanova, *Especialista en Radiología.*

Referencias bibliográficas

- ABBATUCCI, JS.; BLOQUEL, J.; QUINT, R.; BLIN, O.; ROUSSEL, A.; VIALLANEIX, JP: «Techniques de Telecobaltoterapie Radicale», *L'expansion scientifique*, París, 1968.
- ABEL, J.; GONZÁLEZ, L.: «Los efectos biológicos de las bajas dosis de radiación», *Radioprotección*, núm. 7, 1994.
- AETS. Agencia de Evaluación de Tecnología Sanitaria. Instituto de Salud Carlos III. Ministerio de Salud y Consumo. *Braquiterapia para el tratamiento del cáncer ginecológico y otras localizaciones*. Madrid AETS. Diciembre, 2000.
- AMEL SANS, A.: *Atlas de radiología clínica*, págs. 9-14. Publicaciones Laboratorio Robert, 1934.
- BIETE, A.: «Oxigenación Tumoral. Implicaciones en el microentorno del tumor y en el tratamiento oncológico». Sesión Científica *Hipoxia y Microentorno Tumoral*. Estocolmo. (Suecia). Marzo 2001.
- BURGER, P.; GREEN, S.; STRIKE, T.; VOGEL, F.: «Glioblastoma multiform and anaplastic astrocitoma. Pathologic criteria and prognostic implications», *Revisions Cáncer*, vol. 56. 1.105-1.110. 1988.
- Comisión de las Sociedades Oncológicas para la planificación de la Oncología en España. *Libro Blanco de la Oncología en España*. Editorial Jims. Barcelona, 1988.
- DEBONNIERE, C.: *Guide Pratique Telecobaltotherapie*. Vigot editions. París, 1980.
- DE VITA, VT.; HELLMAN, S.; ROSENBERG, SA.: *Cáncer. Principios y práctica de oncología*, 6.ª Edición. Salvat Editores, 1999.
- DUEÑAS, MR.; JAÉN, A.; PORRAS, I.; SÁNCHEZ, P.; MEDINA, B.; GONZÁLEZ, E.; CABRERO, A.; CAPLLONCH, M.; MARTOS, M.; LOZANO, A.; CASANOVA, MA.: «Preliminary results of paclitaxel regimen and concomitant radiotherapy in advanced head and neck cancer». Abstract Book 25 th ESMO Congres. Hamburg (Germany). Octubre 2000. *Annals of Oncology*, vol. 11, 2000.
- ERRAZQUIN, L.: «Incidencia de la anemia en Oncología Radioterápica». Sesión científica. *Hipoxia y Microentorno Tumoral*. Estocolmo (Suecia). Marzo 2001.
- FOWLER, J.: «New horizons in radiation oncology», *British Journal Radiology*, 1979-3; 215-219.
- GIL GIL, JM.: «Temazolamida: Aspectos generales, mecanismo de acción, farmacología, interacciones medicamentosas y efectos secundarios». *Revisiónes en cáncer*, vol. 14: 49-55. Aran Ediciones, 2000.
- GILBERT H. FLEYCHER: «Textbook of Radiotherapy», *Lea and Febiger*. Philadelphia, 1980. 3.ª edic.
- GRAFMAN, S.; BRAHME, A.: «Proton radiotherapy with the Uppsala cyclotron. Experience and plans», *Strablenterapie*, 161: 350-353.1985.
- GRAY, LH.; EBERT, M.: «The concentration of oxygen dissolved in tissues at the time of irradiation a as factor in radiotherapy», *British Journal Radiology*, 1953; 26: 638-646.
- HAN, I.; CHUBA, P.; DEVI, S.; ORTON, C.; DEPPE, G.: «Multifractionated high dose rate brachytherapy with concomitant daily teletherapy for cervical cancer», *Gynecologic Oncology*, 1996 63: 71-75.
- ICRP-60: Recomendaciones 1990. Comisión internacional de protección radiológica. Sociedad Española de Radioprotección. 1995. Madrid.
- JOHN, M.; FLAM, M.; CAPLAN, R.; ROMAN, M.; QUIVEY, J.; STENFIELD, A.: «Final results of a phase II chemoradiation protocol for locally advanced cervical cancer»: RTOG 85-14. *Gynecologic Oncology*, 221-225. 1996.
- LEVITT, S.; TAPLEY, N.: «Technological basis of radiation therapy. Practical clinical applications». *Lea and Febiger*. Philadelphia 1984. 4.ª edic.
- LÓPEZ DE LA OSA, L.: «Estudio histórico en la evolución del tratamiento del cáncer de cuello uterino», *Revista Española de Oncología*, núm. 28: 568-590. 1981.
- LÓPEZ LARA, F.: «El descubrimiento de Roentgen. Los rayos X en la Ciencia, en la Industria y en la Medicina. 80 años de Rayos X», *Heraldo de Aragón*, Zaragoza.
- MARTOS, M.; JAÉN, A.; GONZÁLEZ, E.; MEDINA, B.; SÁNCHEZ, P.; CABRERO, A.; PORRAS, I.; MOHEDANO, N.; CAPLLONCH, M.; FERNÁNDEZ, M.; LOZANO, A.; CASANOVA, MA.: «Radioterapia concomitante con taxol y carboplatino en cáncer avanzado de cabeza y cuello. Resultados preliminares». Fase I y II. X Congreso Nacional AERO. Barcelona, octubre 1999. *Revista Oncología*, vol. 1. Suplemento 3. 1999.
- OKAWA, T.; DOKIYA, T.; HISHIKAWA, Y.: «Multi-institutional randomized trial of external radiotherapy with and without intraluminal brachytherapy for esophageal cancer in Japan», *Japanese Society of therapeutic radiology and oncology*, 45. 624-629. 1999.
- PETSCHEN VERDAGUER, I.: *Las radiaciones ionizantes en la curación del cáncer*. Real Academia de Medicina de Valencia. Valencia, 1995.
- POURQUIER, H.; GIL GAYARRE, M.: *La Télécobaltoterapie en Cancérologie*, págs. 4-21, 39-52, 85-112. Massons Editeurs. París, 1962.
- SEFM. «Procedimientos recomendados para la dosimetría de fotones y electrones de energías comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos». Comité de dosi-

- metría en radioterapia de la Sociedad Española de Física Médica. 1984.
- SALMON IZA, E.; RUEDA CAÑUELO, M.C.; CASANOVA GARCÍA, M.A.: «Programa de Calidad en Radioterapia», *Manual de Funcionamiento y Radioprotección*. Servicio de Radioterapia H.C.E. «Ciudad de Jaén». Imprenta Andaluza. Diciembre 1999: 115-153.
- SCHMITT, G.; MILLS, E.: «The rol of neutrons in the treatment of soft tissue sarcomas», *Cáncer*, 64: 2.063-2.067. 1989.
- SEFM.: «Radioprotección». Sociedad Española de Física Médica. *Revista SEFM*, núm. 16, nol. 5. 1997.
- VALLS, A.; ALGARA, M.: *Radiobiología*, págs. 23 -25. Ediciones Eurobook, S.L. Madrid, 1994.
- WINTZ HERMANN: *Die Röntgenbehandlung des Mammarkarzinoms*. G. Thieme, págs. 7-16. 1924, Germany.
- WINTZ HERMANN: *Die Röntgenbehandlung des Uteruskarzinoms*. G. Thieme, págs. 11-12. 1924, Germany.
- WOOTTON, R.: «Radiation Protection of patients», *Radioprotección*, vol. 7. 1994.
- WAMBERSIE, A.: «The role of radiation therapy in cancer therapy in the year 2000», *Strahlenther Oncology*, 1989, págs. 358-360.