

*Compendio de Curso para
Tecnólogos en Radioterapia*

Oficial Técnico:

Eduardo Rosenblatt

Jefe de Sección: Radiobiología Aplicada y Radioterapia – NAHU - OIEA

Revisor de redacción:

Sergio Binia, NAHU – OIEA

Nota de la redacción

Este compendio ha sido editado por expertos designados por OIEA como un complemento de la colección de presentaciones para planificar e implementar un curso de formación para tecnólogos en radioterapia (RTTs).

Aunque se ha tomado gran cuidado para mantener la exactitud de la información contenida en este compendio, ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse de su uso.

El uso de determinadas denominaciones de países y/o territorios no implica ningún juicio por parte de la editorial, OIEA, en cuanto a la situación jurídica de esos países o territorios, de sus autoridades e instituciones o de la delimitación de sus fronteras.

La mención de nombres de empresas o productos específicos (estén o no indicados como registrados) no implica ninguna intención de infringir los derechos de propiedad, ni debe interpretarse como un aval o recomendación por parte del OIEA.

PREFACIO

El proceso denominado Perfil Estratégico Regional (PER) para América Latina y el Caribe 2007-2013, liderado por OIEA/ARCAL en 2007 y con la participación de numerosos expertos de la región, identificó los problemas y limitaciones más relevantes en la región en el área de las aplicaciones nucleares en medicina y otras áreas.

La falta de profesionales entrenados en número suficiente fue identificada como uno de los obstáculos más serios para la implementación de la radioterapia moderna en la región. Esta carencia afecta a físicos médicos, tecnólogos radioterapeutas, médicos radioncólogos así como también ingenieros biomédicos y de mantenimiento de equipos.

El proceso mencionado fue seguido por una nueva versión actualizada: “Perfil Estratégico Regional para América Latina y el Caribe 2016 – 2021”. En este nuevo periodo se identificó como problema número 3 “la insuficiencia de tecnólogos en radioterapia y medicina nuclear para el cubrimiento de la creciente necesidad ligada a la aparición de nuevos centros en la región”.

La División de Salud Humana del OIEA reconoce el rol esencial que cumple el tecnólogo como integrante activo del equipo multidisciplinario requerido para el proceso de la radioterapia. Su rol requiere no sólo el operar los equipos en forma adecuada, sino el hacerlo con una comprensión de los principios biológicos, oncológicos y tecnológicos que sustentan la función que cumple. Además, en la práctica diaria el tecnólogo es la primera línea de comunicación entre el paciente tratado y el equipo de salud, lo cual implica poseer habilidades de comunicación y sensibilidad humana frente al paciente.

Para dar respuesta a este problema varios proyectos regionales OIEA/ARCAL han incluido actividades específicas para los tecnólogos. El Proyecto RLA6058/68 incluyó un área temática dedicada a la educación y actualización de tecnólogos radioterapeutas de América Latina. En el marco de dicho proyecto se realizaron tres cursos regionales para tecnólogos: en Guayaquil, Ecuador (17-21 noviembre 2008), en Santiago, Chile (12-16 abril 2010) y en Ciudad de México (2 6 julio 2012). Dichos cursos fueron dictados por un grupo de docentes expertos de América Latina, España y Francia.

Uno de los productos de estos cursos fue una colección de 29 presentaciones en español que se ofrecen en la página web de la División de Salud Humana para ser utilizadas en cursos de formación o actualización de tecnólogos. Dicha colección contiene todas las ponencias editadas que fueron presentadas en los 3 cursos a una audiencia constituida por tecnólogos radioterapeutas de América Latina. Las presentaciones PowerPoint son complementadas por este “Compendio” que contiene un resumen del tema correspondiente a cada presentación. De este modo, el coordinador/a y los docentes de un curso para tecnólogos dispondrán de una colección de presentaciones así como una orientación básica sobre cómo usarlas.

Este material puede ser usado por el tecnólogo individual para actualizar sus conocimientos básicos y sobre las nuevas tecnologías. Puede ser utilizado también por escuelas y cursos de formación de tecnólogos en la región como material didáctico para la enseñanza.

INDICE

1. Aspectos clínicos del cáncer	1
2. Principios físicos de la radioterapia	5
3. Aspectos biológicos del cáncer	9
4. Principios de radiobiología	13
5. Sistema de seguridad en aviación y en radioterapia	16
6. Equipos de tratamiento con radioterapia	17
7. Calibración de equipos	21
8. Planificadores y algoritmos de cálculos	24
9. Cuarto de moldes y accesorios	26
10. Equipos y principios de simulación	28
11. Simulación de tumores ginecológicos	31
12. Simulación de tumores de cabeza y cuello	35
13. Simulación de tumores del sistema nervioso central	38
14. Simulación de tumores del tórax	41
15. Simulación de tumores de próstata	44
16. Simulación de radioterapia en oncología pediátrica	48
17. Simulación de linfomas y aparato gastrointestinal	51
18. Simulación de radioterapia en cáncer de mama	55
19. Simulación de radioterapia en sarcomas	58
20. Garantía de calidad	60
21. Dosimetría 'in vivo'	63
22. Protección radiológica	65
23. Altas tecnologías: radioterapia robotica	69
24. Optimización de la seguridad y prevención de incidentes graves en radioterapia ...	71
25. Alta tecnología:	73
26. Modelos de organización del trabajo, calidad, esquema y productividad, innovaciones tecnológicas y seguridad terapéutica	76
27. Caracterización de un <i>bolus</i> elaborado en una unidad de radioterapia	77
28. Braquiterapia	79
29. Normativa nacional (República de Chile)	83

1. ASPECTOS CLÍNICOS DEL CÁNCER

El desarrollo de las enfermedades neoplásicas suele obedecer a múltiples causas y condiciones. Deben tenerse en consideración:

Factores geográficos y ambientales

- Migración y cambio de incidencia de neoplasias
- Descendencia en inmigrantes
- Riesgos ocupacionales (exposición a carcinógenos)
 - Asbestos
 - 2-Naftilamina
 - Vinilcloride
- Estilo de vida y costumbres dietéticas
 - Obesidad
 - Alcohol
 - Tabaco
 - Dieta
 - Hábito sexual

Edad

- El cáncer es más frecuente luego de los 55 años
- La mayor mortalidad se registra entre los 55 y 74 años
- Causa del 10% de las muertes en menores de 15 años en EE.UU.
- Neoplasias infantiles más comunes
 - Neuroblastoma
 - Tumor de Wilms
 - Retinoblastoma
 - Leucemias agudas
 - Rbdomiosarcoma
- Leucemia aguda y tumores del sistema nervioso central causan el 60% de las muertes por cáncer en menores de 15 años en EE.UU.

Predisposición hereditaria al cáncer

- Síndromes de Cáncer Hereditario
‘Predisposición hereditaria caracterizada por una historia familiar de cáncer infrecuente’
 - Retinoblastoma familiar
 - Poliposis adenomatosa familiar del colon
 - Síndrome de neoplasia endocrina múltiple
- Cánceres Familiares
‘Agregación familiar evidente pero predisposición hereditaria poco clara’

- Cáncer de mama
- Cáncer de ovario
- Cáncer de colon
- Síndromes de defecto en la reparación del DNA
 - ‘Sin herencia de genes relacionados directamente con desarrollo de neoplasias’
 - Xerodermia pigmentosum
 - Ataxia-telangiectasia

Desórdenes preneoplásicos adquiridos

- Lesiones preneoplásicas
 - Gastritis atrófica crónica de la anemia perniciosa
 - Queratosis solar de la piel
 - Colitis ulcerosa crónica
 - Leucoplaquia oral, vulvar y peniana
- Transformación maligna de neoplasias benignas
 - Adenoma vellosos de colon

Un cáncer diagnosticado a tiempo es potencialmente curable. Existen diversos procedimientos diagnósticos que posibilitan la detección precoz de varias patologías. Entre ellos, podemos mencionar la mamografía, radiología torácica, exámenes de sangre, búsqueda de sangre oculta en deposiciones, métodos endoscópicos, colposcopia/Papanicolaou, biopsias.

Siempre es recomendable contar con la identificación histopatológica del cáncer que se sospecha, ya sea con el estudio de una pieza quirúrgica completa o de un espécimen de biopsia. Una vez caracterizada la patología, se procederá a su estadificación. Ello implica ejecutar una serie de estudios complementarios que permitirán definir la magnitud del compromiso local, regional o sistémico de la enfermedad.

Luego de una adecuada estadificación se podrán plantear las distintas opciones terapéuticas para determinada situación clínica. Asimismo, la intención radical (curativa) o paliativa del tratamiento que se ofrecerá.

Los tratamientos considerados estándares en oncología son la cirugía, la radioterapia y la terapia sistémica (quimioterapia, hormonoterapia, inmunoterapia, terapias blanco). Ellos pueden administrarse como tratamiento exclusivo o como combinación terapéutica, de acuerdo al tipo y estadio de la enfermedad, entre otros factores.

Algo que aún no se ha mencionado, y que quizá debió hacerse al principio de esta síntesis por su relevancia epidemiológica, lo constituye el análisis de la incidencia y mortalidad del cáncer. Mundialmente, para todos los géneros y en orden decreciente, las cinco neoplasias de mayor incidencia son el cáncer de mama, próstata, pulmón, colon/recto y cuello uterino. Sin embargo, los dos más frecuentes no son los que mayor mortalidad registran. El líder en mortalidad es el tercero, el cáncer broncopulmonar.

En América Latina un 20% de las muertes son atribuidas a cáncer. Esta enfermedad, en combinación con las cardiopatías y los accidentes, constituyen las causas más frecuentes de muerte en la región.

A continuación, para resolver algunas inquietudes que surgen respecto a temas oncológicos diversos, se hará una breve referencia a tres temas centrales: factores de riesgo en cáncer de cuello uterino; utilidad de la radioterapia y expectativa de vida en pacientes con metástasis óseas; beneficios de la radioterapia en cáncer de mama.

Cáncer de cuello uterino. Factores de riesgo

- Edad de inicio de la actividad sexual
- Múltiples parejas sexuales
- Pareja con múltiples parejas sexuales
- Pacientes inmunosuprimidas
- Virus del papiloma humano (VPH; *sigla en inglés HPV*)
 - El 30% de las estudiantes universitarias en EE.UU. están infectadas
 - Un 8% de los hombres entre los 15 y los 49 años están infectados
 - Los subtipos de HPV 6 y 11 (bajo riesgo) se asocian al desarrollo de condilomas y displasia leve que usualmente no progresan a cáncer
 - Los subtipos 16, 18, 31, 33 y 35 (alto riesgo) frecuentemente se asocian a displasias severas y tienen la potencialidad de progresar a cáncer
 - Los subtipos de alto riesgo sintetizan las proteínas E6 y E7, inactivadoras del gen supresor tumoral p53
 - La inactivación del gen supresor p53, ya sea por infección viral o mutación, constituye el componente central del proceso de transformación maligna

Metástasis óseas. Expectativa de vida

- El objetivo de la radioterapia es prevenir o paliar síntomas o disfunciones en lo que le resta de vida al paciente
- Si sólo se brindan cuidados generales, el 30% de los pacientes sintomáticos desarrollan una fractura o compresión medular o nerviosa
- Entre los pacientes que obtienen alivio tras la radioterapia, éste dura al menos el 70% de su vida restante. Entre el 10 y el 30% de los pacientes no obtienen beneficio
- Las expectativas de vida, según la localización del tumor primario son:
 - Próstata ≈ 29 meses
 - Mama ≈ 23 meses
 - Riñón ≈ 12 meses
 - Pulmón ≈ 4 meses
- El 20% de los pacientes con cáncer de mama diseminado tienen metástasis óseas como única manifestación de enfermedad sistémica. La supervivencia en este grupo alcanza el 45% a 5 años

Cáncer de mama. Rol de la radioterapia

- El papel de la radioterapia en el cáncer de mama deriva del riesgo de recidiva local y regional que existe luego del tratamiento quirúrgico.
- Existen diversos estudios clásicos que comparan la tasa de recidiva local tras mastectomía radical vs. tumorectomía. El estudio NSABP B-06 (2163 pacientes) demostró que la frecuencia de recidivas de la tumorectomía sola es superior al triple de las que se presentan cuando se practica mastectomía (39% vs. 11,8%). En los casos en que la tumorectomía se complementó con radioterapia, la tasa de recidiva se redujo a un 10%. En el ensayo INT Milán (701 pacientes), la tasa de recidiva fue la misma para la mastectomía como para la cuadrantectomía asociada a radioterapia adyuvante (2%).
- En el año 2000 la Conferencia de Consenso del *National Institute of Health* (EE.UU.) recomendó como estándar al tratamiento radiante luego de la cirugía de conservación mamaria, tanto en la enfermedad localizada como en aquella con compromiso linfático regional.
- Estudios de metanálisis han corroborado que la radioterapia reduce la mortalidad por cáncer en mama y mejora la supervivencia total a 15 años en mujeres portadoras de metástasis linfáticas axilares. También reduce la mortalidad por cáncer de mama a 15 años en pacientes con enfermedad mamaria localizada. Sin embargo, no sucede lo mismo en mujeres añosas con neoplasias localizadas bien diferenciadas.

2. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA RADIOTERAPIA

La terapia radiante es una herramienta poderosa para el tratamiento de las enfermedades neoplásicas, pero puede ser peligrosa si no se conoce con precisión la cantidad y distribución de la radiación administrada al paciente.

Definir las cantidades físicas, las unidades en las que se miden y la forma en que la radiación interactúa con el medio es importante para una mejor comprensión de esta disciplina. Asimismo, para lograr la precisión requerida en la misma.

Las principales magnitudes y unidades radiológicas son:

- Dosis absorbida (D)
 - Energía absorbida de la radiación ionizante por unidad de masa.
 - Su unidad es el Gray (Gy). $1\text{Gy} = 1\text{Joule/kg}$ (1J/kg)
- Kerma (K)
 - Energía transferida por la radiación indirectamente ionizante a partículas cargadas por unidad de masa.
 - Su unidad es el Gray (Gy). $1\text{Gy} = 1\text{Joule/kg}$ (1J/kg)
- Exposición (X)
 - Carga liberada por la radiación ionizante por unidad de masa de aire.
 - Su unidad es el Coulomb/kg (C/kg) = Coulomb.kg⁻¹ (C.kg⁻¹). La actual unidad reemplaza al Röentgen (R). $1\text{R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
- Actividad (A)
 - Número de desintegraciones por unidad de tiempo.
 - Su unidad es el Becquerel (Bq). $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$. La actual unidad reemplaza al Curie (Ci). $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{Bq}$

En cuanto a la estructura atómica cabe destacar los siguientes conceptos:

- En el átomo neutro el número de protones del núcleo se denomina número atómico (Z). El número de protones del núcleo es igual al número de electrones orbitales
- El número másico es la suma del número de protones y neutrones del núcleo de un determinado átomo. Los isótopos son átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos contienen un número diferente de neutrones; por lo tanto difieren en número másico. Los distintos isótopos de un elemento, difieren entonces en el número de neutrones de su núcleo
- Los radioisótopos son isótopos inestables que decaen a núcleos estables emitiendo radiación (desintegración radiactiva)
- Un nucleído representa cada una de las posibles combinaciones del número de protones y neutrones de cierto elemento
- La velocidad con la que se desintegra un núcleo radiactivo está relacionada con la constante de semidesintegración lambda (λ). Esta constante caracteriza la probabilidad de desintegración propia de cada nucleído

Interacción de la radiación con la materia

- Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el evento por el cual un fotón incidente transmite toda su energía a un electrón ligado. El electrón, la traduce en energía cinética y abandona su lugar orbital provisto de movimiento. El vacío es ocupado por otro electrón (de mayor energía) procedente de una órbita externa. La diferencia entre ambas energías se disipa con la emisión de radiación electromagnética característica (fotoelectrones).

Las sucesivas interacciones de fotoelectrones con electrones de otros átomos, dan lugar a ionizaciones. Los electrones puestos en movimiento sufren cambios de direcciones y energía al interactuar con la materia. Los cambios de dirección se traducen en emisión de nuevos fotones (radiación de frenado; *bremsstrahlung* en alemán). El efecto fotoeléctrico se producirá cuando la energía del fotón incidente sea algo superior a la energía de ionización de cada capa. La atenuación por el efecto fotoeléctrico es máxima a menor energía y varía para cada material absorbente.

El efecto fotoeléctrico está siempre acompañado de radiación X característica con valores definidos para cada valor de Z, o sea para cada material absorbente. Entonces, se puede medir un espectro continuo de energías proveniente del material irradiado. Este espectro se verá ‘interrumpido’ en su continuidad por picos de radiación característica, típica para cada material.

- Efecto Compton

El efecto Compton se produce si el fotón incidente interacciona con un electrón de capas superficiales (poco ligado), cediéndole parte de su energía. El electrón es arrancado de su órbita, mientras que el fotón es desviado de su trayectoria con menor energía (fotón dispersado).

El electrón desprendido, surge proyectado hacia ‘adelante’ con un ángulo menor a 90°, mientras que la radiación dispersa (fotón dispersado), puede tomar cualquier dirección.

La absorción por efecto Compton se produce con mayor probabilidad a energías incidentes de mediana intensidad (500 keV a 5 MeV).

El coeficiente de atenuación másico disminuye progresivamente según aumenta la energía del fotón incidente. El coeficiente de atenuación másico es independiente del material absorbente.

El efecto Compton predomina en la irradiación que se utiliza en medicina terapéutica (radioterapia).

- Formación de pares

La formación de pares se da cuando un fotón de alta energía se acerca a las proximidades de un núcleo. La onda electromagnética incidente (fotón) se transforma en materia en la forma de un electrón y un positrón que surgen proyectados hacia ‘adelante’. El electrón y el positrón forman con el fotón un ángulo, que será más agudo cuanto mayor sea la energía incidente.

La ‘vida’ del positrón es efímera, pues tiende a unirse a cualquier electrón próximo y mediante el proceso de aniquilación generar dos fotones en direcciones opuestas y de 0.5 a 1 Mev cada uno (transformación de materia en energía).

Cantidades básicas y unidades (Sistema Internacional)

Cantidad básica	Símbolo	Fórmula	Unidad (símbolo)
Masa	m		kilogramo (kg)
Longitud	l		metro (m)
Tiempo	t		segundo (s)
Corriente eléctrica	I		Ampere (A)
Velocidad	v	$v = l / t$	$m / s = m \cdot s^{-1}$
Aceleración	a	$a = v / t$	$m / s^2 = m \cdot s^{-2}$
Fuerza	F	$F = m \cdot a$	Newton (N) = $kg \cdot m / s^2$
Energía o Trabajo	E ; \mathcal{E}	$E = F \cdot l$	Joule (J) = N . m
Potencia	P	$P = E / t$	Watt (W) = J / s
Frecuencia	f ; ν	$\nu = n^{\circ}(\text{repeticiones}) / t$	Hertz o hercio (Hz) = 1 / s

Conceptos de Kerma, Dosis y Exposición

- Kerma: transferencia de energía a partículas cargadas

$$K = \frac{\Delta \epsilon_{\text{transferida}}}{\Delta m}$$

- Dosis: absorción de energía en un elemento de volumen

$$D = \frac{\Delta \epsilon_{\text{absorbida}}}{\Delta m}$$

- Exposición: medida de la capacidad o ‘habilidad’ de un haz de fotones para ionizar el aire. Recordar que sólo se define para fotones y aire

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Ley del Cuadrado Inverso de la Distancia

Las magnitudes que se miden de kerma en aire, dosis en aire y exposición en cierto punto son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa de la fuente de producción del haz radiactivo. La ecuación que expresa esta propiedad es la siguiente:

$$\left[\frac{X'(f_a)}{X'(f_b)} \right] = \left[\frac{D'(f_a)}{D'(f_b)} \right] = \left[\frac{f_b}{f_a} \right]^2,$$

siendo X' es la tasa de exposición, D' es la tasa de dosis, f_a y f_b las distancias.

La distribución de dosis depende de la calidad del haz (energía), diámetro de la fuente radiactiva, tamaño del campo de radiación, distancia entre la fuente y la superficie del cuerpo irradiado (DFS), distancia entre la fuente y colimadores del haz, sistemas de colimación y accesorios (cuñas, bloques conformadores, compensadores).

El análisis de la distribución de dosis en profundidad y en planos transversales al eje del haz, así como la consideración de tejidos de distinta densidad son la base del estudio de la planificación y cálculo de tratamientos radiantes simples y complejos.

3. ASPECTOS BIOLÓGICOS DEL CÁNCER

Entendemos el cáncer como una enfermedad genética que agrupa a un conjunto heterogéneo de patologías que han perdido el equilibrio de la relación entre proliferación y muerte celular. Esta desregulación de mecanismos genéticos y epigenéticos le dan al cáncer su condición de malignidad y por ende, la capacidad de invadir localmente y diseminarse a distancia (metástasis).

Origen genético del cáncer

Los proto-oncogenes son genes normales que codifican proteínas; estas pueden tener influencia en el ciclo celular favoreciendo los procesos proliferativos o inhibiendo la muerte celular programada (apoptosis). A los proto-oncogenes mutados (anormales) se les denomina oncogenes.

El cáncer se desarrolla producto de mecanismos genéticos y epigenéticos.

- Mecanismos genéticos

1. Alteración de los genes que regulan la proliferación

Algunas de las vías cuya alteración puede dar lugar a una proliferación celular incontrolada son:

Mutación puntual: por ejemplo, el oncogen *ras* produce una señal constante de proliferación celular

Traslocación: por ejemplo, el oncogen *c-myc* impide salir a la célula del ciclo celular y la aberración *abl-bcr* controla una señal de división celular

Amplificación: por ejemplo, se sabe que la expresión del oncogen *rEGF* tiene sobre la célula un efecto mitógeno

2. Alteración de los genes que regulan la apoptosis

Los organismos multicelulares tienen un mecanismo complejo y muy regulado por el que se produce el 'suicidio celular' o muerte celular programada. Este fenómeno se denomina apoptosis. Su alteración puede dar lugar a un fenómeno de 'inmortalidad celular'.

Entre los mecanismos extrínsecos de regulación de apoptosis podemos mencionar los factores de membrana como son las citocinas FasL y los factores de necrosis tumoral (TNF). Entre los mecanismos intrínsecos, por ejemplo vía mitocondrial, encontramos el citocromo c, flavoproteínas inductoras de la apoptosis y activadoras de las caspasas (autodestrucción celular).

3. Alteración de los genes que regulan la reparación del ADN

Son genes que codifican enzimas reparadoras, capaces mantener la estabilidad del ADN que hubo sido dañado por algún agente carcinogénico.

Algunos ejemplos de esta alteración son los genes BRCA-1 y BRCA-2 involucrados en el desarrollo de cáncer mamario y las copias defectuosas MLH1, MLH2 y MLH6 vinculadas al cáncer de colon.

4. Alteración de genes que regulan el envejecimiento celular

El telómero (modulado por telomerasas) es el ‘reloj biológico’ de las células humanas; se localiza en el extremo de los cromosomas. El 90% de las células neoplásicas expresan telomerasas. Sus alteraciones pueden dar lugar a la supervivencia anormal de células envejecidas y que por lo tanto, pueden portar aberraciones genéticas seniles.

5. Alteración de los genes supresores

Son genes reguladores del crecimiento celular; suprimen la proliferación celular. El primer gen supresor identificado fue el del retinoblastoma (gen *Rb*). La mutación de estos genes implica la pérdida de la función supresora. Son numerosos los oncogenes supresores estudiados; entre los más conocidos se encuentran el *p53*, *Rb*, *DCC*, *MCC*, *APC*, *NF1*, *NF2* y *WT*.

- Mecanismos epigenéticos

La epigenética es la encargada de regular la expresión de los genes. Los fenómenos epigenéticos son la metilación y la acetilación. El 90% de los tumores tienen alguna alteración de estos mecanismos epigenéticos.

A todos aquellos cambios en el ADN sin alteración de su secuencia, pero sí de la remodelación de la cromatina y que modifican la regulación transcripcional de los genes, se les conoce como eventos epigenéticos.

La angiogénesis se define como la formación de nuevos vasos sanguíneos a partir de vasos preexistentes. Debido a su exagerada velocidad de multiplicación celular y generación de *destritus*, los tumores necesitan generar nuevos vasos. Ello les permite una adecuada llegada de nutrientes y una mayor capacidad de eliminar productos. Se origina así, un aumento patológico de la angiogénesis.

La diseminación a distancia de los tumores, también llamada producción de metástasis, puede originarse por varios mecanismos. Los principales son:

Escape inmunológico: bloqueo de la función y maduración de linfocitos y células dendríticas debido a la acción de factores séricos elevados (ICAM-1 y VEGF) en pacientes portadores de neoplasias.

Adhesión a la pared endotelial y migración transendotelial: la célula tumoral circulante, una vez ‘sorteada’ la vigilancia inmunitaria del huésped, puede adherirse firmemente a la pared del vaso y penetrar posteriormente a través de éste para multiplicarse en el tejido extravascular.

Clasificación de los tumores

La clasificación de los tumores benignos y malignos implica un vasto conocimiento de embriología, histología y anatomía patológica. En esta síntesis, sólo mencionaremos la nomenclatura de los tumores malignos (cánceres o neoplasias) más frecuentes.

Las neoplasias, de acuerdo al tejido de origen, se pueden clasificar como:

- Carcinomas

- Este grupo de cánceres se originan en la piel o en cualquiera de las células epiteliales existentes en los órganos internos. Algunos ejemplos:
 - Carcinoma epidermoide: se origina en la piel y tiende a producir queratina
 - Adenocarcinoma: cualquier carcinoma que se origina en epitelio glandular (adenocarcinoma de mama, de próstata, de colon, de páncreas)
 - Carcinoma escamoso o pavimentoso: similar al epidermoide de piel, pero esta denominación se refiere al origen en epitelio plano de revestimientos internos (laringe, faringe, esófago, ano, cuello uterino, vagina)
 - Carcinoma de células transicionales: se origina en las células transicionales del tracto urinario (pelvis renal, uréter, vejiga)

- Sarcomas

Son neoplasias que tienen su origen en los llamados ‘tejidos blandos’. Estas estructuras incluyen a hueso, cartílago, grasa, músculo, vasos y cualquier fibroblasto del tejido conectivo. Algunos ejemplos:

- Osteosarcoma
- Condrosarcoma
- Liposarcoma
- Rabdomiosarcoma, Leiomiomasarcoma
- Angiosarcoma, Linfosarcoma
- Fibrosarcoma

- Leucemias

- Estas neoplasias hematológicas se originan en la médula ósea, la que acumula formas inmaduras de células sanguíneas que salen a la circulación.
- Según sus características clínicas se dividen en agudas y crónicas. De acuerdo a la serie hematológica afectada se clasifican en mieloides y linfoides.

- Linfomas

Se originan en los linfocitos. Son más frecuentes en los ganglios linfáticos, pero pueden desarrollarse en cualquier órgano donde se encuentren estas células. Se subdividen en linfomas Hodgkin y linfomas no Hodgkin; a su vez cada uno tiene sus diversas variedades clínico-patológicas.

Existe una entidad que afecta a los linfocitos productores de anticuerpos (células plasmáticas) denominada plasmocitoma. Su forma más avanzada y que afecta una gran proporción del tejido esquelético se denomina mieloma múltiple.

Si un tejido neoplásico es estructural y funcionalmente similar al tejido u órgano que le dio origen, se designa como un cáncer bien diferenciado o grado 1. Si se parece poco, pero todavía ofrece ciertas similitudes, se califica como moderadamente diferenciado, semidiferenciado o grado 2. Si ha perdido todas las características del órgano originario, es una neoplasia poco diferenciada o grado 3. Los tumores son más

agresivos y tienen mayor potencial de diseminación a medida que se hacen menos diferenciados.

Existen metástasis de tumores indiferenciados cuyo tejido de origen no se puede precisar (metástasis de origen primario desconocido).

Un dado cáncer puede definirse como localizado o diseminado. A su vez, la diseminación puede ser regional (estaciones linfáticas próximas) o sistémica (metástasis a distancia). Por ejemplo, un adenocarcinoma grado 1 de mama, con un diámetro de 4 mm y sin metástasis linfáticas axilares ni diseminación a órganos distantes, es un cáncer de mama localizado en estadio temprano. Lo contrario, un tumor que ulcera la piel (localmente avanzado), con linfáticos axilares comprometidos y con metástasis hepáticas y óseas, es una neoplasia regional y sistémicamente diseminada (estadio avanzado).

Para plantear cualquier estrategia terapéutica, es de vital importancia lograr una estadificación óptima de la enfermedad. Debe identificarse con precisión el grado de compromiso local, regional y sistémico del cáncer. Para ello, existen distintas herramientas y manuales de estadificación. El más difundido es el de la *American Joint Committee on Cancer* (AJCC) y la Unión Internacional contra el Cáncer (UICC).

El manual AJCC/UICC denomina ‘T’ al tamaño y compromiso tumoral local, ‘N’ al estado de los ganglios linfáticos regionales y ‘M’ a la presencia o no de metástasis a distancia. Para cada localización de cada neoplasia, se puede recurrir a esta herramienta de estadificación. En ella, cada cáncer se puede clasificar en sus distintos estadios TNM. También se puede obtener una estadificación asociada para cada estadio TNM y simbolizarse con un número romano (estadio I, II, III o IV). Cuanto más avanzado es el estadio de la enfermedad, menos favorable es el pronóstico para el paciente.

4. PRINCIPIOS DE RADIOBIOLOGÍA

El objetivo de la radioterapia es dispensar una dosis de radiación óptima a los volúmenes blanco y a la vez reducir (lo razonablemente posible) las dosis que recibirán los tejidos que no se desean irradiar (órganos de riesgo).

La probabilidad de control tumoral aumenta con la dosis de radiación, pero también aumenta el riesgo de ocurrencia de efectos adversos por la irradiación de tejidos sanos. Las chances de control tumoral se ven entonces limitadas por la tolerancia de los órganos de riesgo vecinos a la neoplasia.

Suele atribuirse a las células malignas la particularidad de ser ‘inmortales’. Más acertado, es aceptar la característica de dividirse a mayor tasa que las células normales (mayor tasa de duplicación). La carencia de adhesión intercelular, y su anárquico índice proliferativo, posibilitan la invasión y la diseminación metastásica de los cánceres.

La tolerancia a las dosis terapéuticas de radiación de los tejidos y órganos sanos depende de factores diversos. Entre ellos, la edad del paciente, su condición clínica general, patologías asociadas, medicación que consume, hábitos tóxicos, etc.

El volumen blanco del tratamiento y su relación espacial con los órganos de riesgo cercanos también afectará significativamente la tolerancia que el paciente tenga a la terapia.

La respuesta de los distintos tejidos al efecto de la radiación terapéutica se clasifica en:

- Reacciones agudas: son particularmente susceptibles aquellos tejidos con proliferación celular rápida (piel, mucosas, folículos pilosos). Este tipo de respuesta depende fuertemente de la dosis total de radiación y del tiempo total de tratamiento; en menos proporción de la dosis por fracción
- Reacciones tardías: este tipo de respuesta es más probable en tejidos de multiplicación celular lenta o en aquellos sistemas no proliferativos (sistema nervioso central, pulmón, riñón, hígado, cartílago, hueso). Los efectos adversos crónicos producto de las reacciones tisulares tardías dependen principalmente de la dosis por fracción. A mayor dosis por fracción, mayor probabilidad de ocurrencia de reacciones tardías y por ende, de efectos adversos crónicos en órganos de recambio celular lento

Uno de los esquemas terapéuticos más utilizados en carcinoma escamoso de cabeza y cuello consiste en dispensar al volumen blanco principal una dosis total de 68-70 Gy en un lapso de 7 semanas. El fraccionamiento típico implica 5 sesiones de radioterapia externa por semana de 2 Gy cada una. Este tratamiento induce mucositis confluyente en un número importante de pacientes.

En el tracto gastrointestinal, como en el caso de la piel y la mucosa oral, se ven frecuentemente complicaciones tempranas y tardías. Con un fraccionamiento de 2 Gy/día y a una dosis total de 50-54 Gy, las reacciones tempranas son en general pasajeras y sus síntomas se revierten a pocos días de finalizado el tratamiento. Menos simples son los efectos adversos crónicos, que pueden sobrevenir como resultado de lesiones agudas severas persistentes o bien, ser de aparición tardía.

A nivel cerebral y nervioso periférico los efectos secundarios son generalmente de presentación tardía. Dentro de los primeros seis meses puede ocurrir desmielinización transitoria. La radionecrosis del tejido nervioso ofrece tiempos de latencia que varían entre 1-2 años.

La pericarditis es la complicación cardíaca radioinducida más frecuente y se pone en evidencia entre los 6 meses y los 2 años posteriores al tratamiento. En tanto, la injuria del músculo cardíaco (miocardio) puede hacerse manifiesta a los 10-20 años subsiguientes. Entre el 15-20 % de los pacientes tratados por linfoma de Hodgkin con técnica de manto y dosis de 30-36 Gy tendrán disfunción cardíaca producto de una fibrosis intersticial difusa inducida por radiación. Todo esto se ve agravado cuando los pacientes han recibido agentes quimioterápicos cardiotóxicos como la doxorubicina, droga de uso estándar en el tratamiento de la enfermedad de Hodgkin.

La estructura y función de los tejidos normales (órganos de riesgo para la radioterapia) ha sido emulada con circuitos eléctricos. Entonces, podemos decir que existen sistemas anatómicos de comportamiento 'en serie', 'en paralelo' o la combinación de ambos.

Las estructuras 'en serie', como la médula espinal o las arterias coronarias, pueden sufrir la pérdida total de función distal debido a que un pequeño volumen del órgano ha sido afectado por la radiación (sección del circuito). En cambio, los órganos de comportamiento 'en paralelo' como los pulmones, admiten daños de extensiones locales considerables sin que se vea afectado el funcionamiento global del sistema en forma significativa.

Para ejemplificar una comparación simple con la cirugía: si con un bisturí se secciona milimétricamente todo el diámetro transversal de la médula espinal, se perderán todas las capacidades motoras y sensitivas de los órganos que respondan a señales distales al corte (comportamiento en serie). Pero si se extirpa un lóbulo de uno de los pulmones y el resto del aparato respiratorio se encuentra indemne, se podrán restituir las funciones completas del sistema (comportamiento en paralelo).

Las 5Rs de la radioterapia

- Reparación

Recuperación del daño celular por mecanismos moleculares intrínsecos. Se produce en unas pocas horas después de la irradiación

- Redistribución

En la irradiación de una población celular, al ser diferente la sensibilidad en las distintas fases del ciclo celular, se produce indirectamente un cierto grado de sincronización de la población. Las células que sobrevivieron probablemente se encontraban en una fase resistente del ciclo celular y en las próximas horas pasarán a una fase sensible (base de algunos fraccionamientos)

- Reoxigenación

Las células sobrevivientes pueden ser hipóxicas (resistentes), pero luego de la dosis de irradiación pueden oxigenarse y aumentar su radiosensibilidad

- Repoblación

Fenómeno homeostático desencadenado por la muerte celular. La proliferación aumenta el número de blancos en un curso prolongado de radioterapia

- Radiosensibilidad

Característica genética intrínseca de cada tumor, dada por su estirpe celular
De las 5Rs de la radioterapia dos de ellas pueden inducir radiorresistencia a una segunda dosis de radiación terapéutica: Reparación y Repoblación. Otras dos estimularían radiosensibilidad: Redistribución y Reoxigenación.

5. SISTEMA DE SEGURIDAD EN AVIACIÓN Y EN RADIOTERAPIA

La aeronáutica, ofrece una de las modalidades de transporte humano más seguras y eficientes. En el año 2006, viajaron en avión dos billones de pasajeros y se registraron 650 víctimas fatales. Ello supone una probabilidad de morir en un viaje aéreo cercana al 0,0004%, muy baja en comparación a otros medios de transporte.

En el mundo de la aviación, como en el de la radioterapia, debe estimularse una consciencia del gerenciamiento de la seguridad y una participación activa en su práctica. La seguridad, como cultura de empresa, debe estar presente en todo momento mediante la implementación efectiva de procedimientos operativos de rutina. Debe existir un sistema claro que permita coleccionar, analizar y compartir datos relacionados a la seguridad.

En los algoritmos de estudio e implementación de sistemas de seguridad contemporáneos existe un compromiso de la alta dirección y una cultura de seguridad corporativa.

Los tres pilares de la seguridad son:

- Procedimientos operativos estándar

Tener presentes procedimientos de actuación estándar (en inglés *Standard Operating Procedures*, acrónimo SOPs) es la primera consigna de seguridad. Las violaciones de los SOPs suponen la potencial existencia de un error, hecho inherente y producto de las limitaciones humanas. Los factores que contribuyen al error pueden ser culturales, obedecer a la falta de entrenamiento, a factores personales, al pobre conocimiento de los procedimientos, a un inadecuado diseño de equipos y/o a factores organizacionales.

- El factor humano

Entender que el usuario normal (trabajador) comete errores es fundamental en la prevención de accidentes

- Comités de seguridad

Estos organismos tendientes a ser interpretados como cuerpos meramente burocráticos deben ser equipos formados por expertos hábiles capaces de actuar eficientemente en la difusión y práctica de la cultura de la seguridad. La difusión de experiencias previas y 'lecciones aprendidas' es una herramienta clave de uso cotidiano por los comités de seguridad.

Todos los accidentes e incidentes, no importa cuán graves sean, deben ser considerados un fracaso del sistema. No deben simplificarse como el fracaso puntual de una persona o grupo de ellas.

6. EQUIPOS DE TRATAMIENTO CON RADIOTERAPIA

Las radiaciones ionizantes son herramientas de uso cotidiano en el diagnóstico y tratamiento de diversas condiciones clínicas. Entre los distintos tipos de radiaciones ionizantes de uso común en terapia radiante se encuentran los rayos X (de baja, media y alta energía), los rayos gamma y los electrones. Los dos primeros son ondas electromagnéticas, los electrones son partículas cargadas y con una masa determinada. Entre otras partículas que también se usan en radioterapia se encuentran los protones y los iones pesados.

A continuación, una descripción sintética de los equipos de uso rutinario en radioterapia.

Equipos de Terapia Superficial

Fueron los primeros equipos utilizados en radioterapia. De acuerdo a la energía de los fotones que emiten se las dividen en:

- Máquinas de terapia superficial; rango de energía desde 50 kV hasta 140 kV
- Máquinas de ortovoltaje; rango de energía desde 150 kV hasta 400 kV

Ambas máquinas generan rayos X para el tratamiento de lesiones superficiales y semiprofundas. El equipo se compone de:

- Generador eléctrico
- Tubo de rayos X

Tiene un diseño especial para soportar tiempos prolongados de generación de rayos X con un ánodo fijo que necesita calentamiento previo. El tubo de los equipos para terapia superficial suele estar vinculado a un soporte vertical que le permite desplazamientos de ascenso y descenso. Toda la 'torre' puede desplazarse horizontalmente mediante ruedas o montada sobre rieles solidarios al piso. El tubo de los equipos de ortovoltaje suele desplazarse horizontalmente colgado de rieles fijos al techo de la sala. Telescópicamente, el tubo se mueve en dirección vertical. Además, admite giro rotacional de 360° y movimientos pendulares

- Consola

Permite ajustar distintas combinaciones de intensidad de corriente (amperaje), energía del haz (kilovoltaje) y tiempos de exposición. Asimismo, dar inicio a la irradiación y detenerla antes del tiempo programado si fuese necesario (parada de emergencia)

- Filtros

Son láminas de aluminio o cobre de distintos espesores agrupados en una sola pieza. Estos son colocados a la salida del haz de radiación. Los rayos X de menor energía que la seleccionada interactúan y son 'absorbidos' por el filtro

- Aplicadores

Son tubos metálicos o de vidrio plomado que se adosan al extremo de salida del haz y lo dirigen hasta la superficie del paciente. Reducen la radiación dispersa y la exposición ambiental.

Unidad de Cobalto

Su estructura básica se compone de:

- Fuente radiactiva de ^{60}Co

El material de la fuente es un radioisótopo sintético; se encuentra en constante desintegración nuclear y emite fotones en forma de rayos gamma. Así, su actividad va decayendo con el paso del tiempo y la 'pastilla' debe ser reemplazada cada 5 años, o sea entorno al período de semidesintegración del ^{60}Co . La energía promedio del ^{60}Co es de 1,25 MV

- Cabezal

En él se aloja la fuente radiactiva. La forma del cabezal de los primeros equipos era parecida a las bombas que llevaban los aviones de guerra, por eso las máquinas se llamaban bombas de cobalto. El cabezal está dotado del dispositivo de entrada y salida de la fuente; posee asimismo el sistema de colimación y el sistema de simulación luminosa del haz. Sus tres funciones básicas son proteger la fuente, exponer la fuente según sea necesario y colimar el haz de radiación

- Puente o Brazo

Se lo suele designar con la palabra inglesa *Gantry*. Es una barra que en un extremo soporta al cabezal y permite que éste gire en torno a un eje fijo que suele encontrarse a 80 o 100 cm de la fuente (eje del isocentro). El brazo se pone en movimiento por la acción de un motor alojado en una estructura fija al piso del búnker (estativo)

- Modificadores del haz

Incorporan un cierto grado de aplanamiento del haz, disminuyendo posibles 'puntos calientes' en el paciente y mejorando la distribución de dosis

- Mesa

Lugar donde se coloca al paciente para el tratamiento. Se desplaza y rota entorno a una 'columna ascensor', la cual a la vez está montada sobre una tarima rotatoria solidaria al piso. Todo el conjunto admite movimientos longitudinales, verticales, transversales, rotacionales y de traslación

Acelerador Lineal

Un acelerador lineal es un equipo que genera rayos X de alta energía. Estos fotones son producto de la colisión de los electrones acelerados con un blanco compuesto de un material de alto número atómico (Z).

Los principales componentes de un acelerador lineal son:

- Fuente de microondas
 - Magnetron: es un generador de microondas. Los electrones que se generan en el cátodo 'viajan' hacia el ánodo, el que tiene cavidades resonantes. Los electrones son sometidos a un fuerte campo magnético; por aceleración y desaceleración de los mismos se producen ondas electromagnéticas en forma de microondas. Típicamente el magnetron opera con un pico de 3 megawatts (MW)

- Klystron: es un amplificador de microondas que necesita ser abastecido por un oscilador de microondas de bajo poder. Es decir, recibe a la entrada ondas electromagnéticas de alta frecuencia (microondas) y baja potencia (400 W) y da a la salida microondas de alta potencia (7 MW). Empleado en aceleradores de alta energía

- Modulador

Suministra los pulsos de alta tensión, que duran unos pocos microsegundos, a la fuente de microondas y al cañón de electrones

- Inyector

El cañón de electrones es la fuente de los electrones que serán acelerados. Al igual que en un tubo de rayos X convencional, los electrones se generan a partir de un cátodo calentado por el proceso de emisión termoiónica

- Estructura aceleradora

Es el componente básico de un acelerador. Consiste de un tubo de cobre cuyo interior está dividido por discos o diafragmas de diferentes aperturas a un alto vacío

- Sistema de orientación y enfoque del haz

Para evitar la desviación del haz se aplica un campo magnético estático a través de una serie de espiras focalizadas y colocadas a ciertos intervalos a lo largo de la guía

- Sistema de plegado *bending magnets*

Los *bending magnets* son imanes de flexión. Son parte de los aceleradores lineales que operan con energías por encima de los 6 MeV, donde la estructura aceleradora es demasiado larga. Generalmente se emplazan paralelos al eje de rotación de la ventana del haz de electrones, los que deben ser ‘desviados’ para que los rayos X puedan salir a través de la ventana (haz de salida)

- Cabezal

Se compone de un filtro aplanador y colimadores que definen las dimensiones del haz. Los colimadores multihojas permiten definir cualquier forma del haz de radiación

- *Gantry*

El *gantry* es la parte del acelerador lineal donde se montan principalmente la estructura aceleradora y el cabezal. Es el que permite la rotación del equipo alrededor del paciente y por ende, administrar tratamientos con múltiples incidencias

- Equipo auxiliar

Sistema de enfriamiento de agua usado para enfriar la estructura aceleradora, el blanco, el circulador y el generador de radiofrecuencia

Nuevas Tecnologías

Uno de los ejemplos más ilustrativos de alta tecnología aplicada a la radioterapia es la tomoterapia. La tomoterapia es una nueva técnica de administración de tratamiento radiante de intensidad modulada (IMRT) que permite verificar y corregir la posición del paciente en cada fracción. Sus objetivos son identificar las estructuras anatómicas mediante la adquisición de imágenes volumétricas durante el curso de tratamiento y corregir los campos de tratamiento de forma automática. Esta tecnología permite realizar tratamientos precisos de volúmenes muy pequeños, muy grandes o múltiples

metástasis y hace posible evaluar y comparar la ubicación diaria de los volúmenes definidos en la planificación. Es un moderno sistema que integra los siguientes equipos en uno solo: tomografía computada helicoidal, acelerador lineal y planificador de tratamiento.

El equipo de terapia helicoidal consta de colimadores multiláminas binarios compuestos por 64 hojas con un tiempo de apertura/cierre de 50 milisegundos. La distancia entre fuente y eje de rotación es de 85 cm y el volumen máximo de tratamiento es de 40 cm de diámetro y 160 cm de longitud. La tasa de dosis es de 850 cGy/minuto y el método de cálculo de dosis se basa en algoritmos de convolución/superposición. El sistema informático está compuesto por 32 procesadores, computadoras que calculan y almacenan toda la información necesaria para la administración del tratamiento.

El *gantry* anular de la tomoterapia ofrece una precisión en el isocentro del orden de las décimas de milímetro, una misma fuente para imágenes y tratamiento que asegura que la tomoimagen coincida exactamente con el volumen irradiado en tiempo real. Ofrece secciones tomográficas cada 5 segundos permitiendo discriminar con nitidez las diferentes estructuras anatómicas como aire, hueso, grasa y músculo. Una dosis de tan sólo 0,5 a 1,5 cGy es suficiente para visualizar estructuras en la tomoimagen, resultando más baja que la dosis dispensada utilizando sistemas de imagen por tomografía convencional.

En tomoterapia se adquiere una imagen de la región de interés y del volumen blanco justo antes de la administración de cada fracción de tratamiento.

Algunas de las localizaciones que más se benefician de esta tecnología son la cabeza, el cuello, los pulmones, la próstata y el sistema nervioso. También es notable el beneficio en los casos de patologías pasibles de recibir radiocirugía estereotáxica sobre volúmenes con diámetros menores a 3,5 cm.

7. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Medir implica comparar una cantidad dada con la considerada cantidad patrón. En radioterapia interesa conocer con precisión tanto la cantidad absoluta de dosis, como las dosis relativas y sus relaciones. La disciplina que se ocupa de ello se conoce con el nombre de dosimetría. Los métodos de medición de dosis en terapia radiante deben ser tales que el resultado sea:

- Repetitivo en períodos cortos de tiempo
- Reproducible a lo largo del tiempo
- Preciso (con mínima incertidumbre)

El motivo se funda en que la dosis debería ser administrada al volumen blanco con una exactitud de $\pm 5\%$ (tolerancia para la desviación entre la dosis prescrita y la administrada). Antes de comenzar con las mediciones dosimétricas las máquinas deben estar en condiciones de operar, es decir, con los controles previos a la calibración dosimétrica completados. Entre ellos, controles visuales, mecánicos (interruptores de movimiento y de radiación), coincidencias (ejes luminosos y radiantes, ángulos, escalas).

El dosímetro para aplicaciones radiantes es el instrumento con el cual se obtiene una lectura representativa de la dosis depositada en el volumen sensible del dosímetro por la radiación ionizante. Los dosímetros para laboratorios primarios pueden ser absolutos o relativos.

Dosímetros Absolutos

- Calorimétricos

Miden energía de una manera muy directa y la dosis absorbida en el volumen sensible del detector (D_{abs}) es proporcional al cambio de temperatura:

$$D_{abs} \propto \Delta T$$

- Por ionización

Recomendada en dosimetría hospitalaria por su simplicidad y precisión. Las dimensiones de las cámaras desde el volumen colector deben ser mayores, o al menos iguales, al alcance máximo de los electrones secundarios para asegurar el equilibrio electrónico (EqE)

- Dosímetros químicos tipo Fricke

Dosímetros Relativos

- Cámara de ionización cilíndrica o dedal

El eje central de la cámara debe ubicarse perpendicular al eje del haz de radiaciones; se agrega caperuza de *build-up* para energías mayores al ^{60}Co

- Cámara de ionización de placas paralelas

Recomendada para zonas con gradientes importantes de dosis (*build-up*), para rayos X de baja energía y para haces de electrones

- Cámara de ionización de aire libre

Colecta los iones producidos en un volumen conocido de aire 'V' y de masa 'm'. Son cámaras de gran tamaño, útiles para energías de rayos X de hasta 300 keV

- Cámara de ionización de cavidad

Se comportan como cavidades de aire que cumplen la teoría de cavidad de Bragg-Gray. Las características de las cámaras de cavidad son las siguientes:

- Cavidad pequeña; escaso gradiente de dosis dentro de la misma
- Material de la pared y del electrodo central homogéneos. Material equivalente al aire o al agua
- Espesor de la pared lo más delgado posible, consistente con la exigencia de robustez y aseguramiento del equilibrio electrónico. Para cámaras 'dedal' se agrega una caperuza para lograr EqE a energías superiores para las que fue diseñada

A continuación se describen las condiciones de referencia para medir haces de ^{60}Co y haces de fotones y electrones de alta energía.

Haces de Fotones de Alta Energía

- Fantoma de agua, cámara de ionización cilíndrica
- Distancia foco superficie o isocentro
- Profundidad (Z) 5 o 10 cm, según la energía
- Tamaño de campo $10 \times 10 \text{ cm}^2$
- Z_{ref} = centro de la cavidad

Haces de Electrones

- Fantoma de agua (o plástico para baja energía), cámara de ionización de placas paralelas (o cilíndrica para altas energías)
- Distancia foco superficie = 100 cm
- Profundidad (Z): Z_{ref} (TRS 398)
- Tamaño de campo $\geq 10 \times 10 \text{ cm}^2$ (baja energía), $\geq 20 \times 20 \text{ cm}^2$ (alta energía)
- Cámara de ionización cilíndrica: centro de la cavidad, cámara de ionización placas paralelas en la superficie interna de la ventana

El dosímetro debe ser calibrado en un laboratorio de calibraciones dosimétricas para transformar la lectura en dosis a través de un factor de calibración. El factor de calibración transforma la lectura en 'el valor verdadero', en este caso la dosis absorbida en agua en el punto P ($D_{\text{agua, P}}$) en ausencia de la cavidad si se cumplen las mismas condiciones para las cuales fue obtenido el factor de calibración.

La calidad del haz es igual a la cantidad representativa de la energía y esto supone el índice de calidad (IC). Para haces monoenergéticos de fotones el IC es igual a la energía de los fotones, mientras que para rayos X de energías medias y bajas el IC es igual a la capa hemirreductora (CHR o HVL). Dos haces tienen la misma energía efectiva si ambos tienen la misma CHR.

El ancho de la zona donde no hay equilibrio electrónico lateral, guarda relación directa con la penumbra física. Se denomina penumbra física debido a que su origen se debe al efecto físico de la interacción de los electrones con el medio ambiente absorbente, la dispersión que sufren y el rango finito que tienen. Hay otro componente de la penumbra, la penumbra geométrica, que es independiente del medio absorbente y que depende exclusivamente de la geometría del cabezal de la máquina de irradiación.

8. PLANIFICADORES Y ALGORITMOS DE CÁLCULOS

El sistema de planificación computarizado es capaz de generar distribuciones de dosis (curvas de isodosis) en pacientes. El objetivo es la optimización de la distribución de dosis en el tumor, reduciendo al mínimo la dosis en el tejido normal para disminuir la toxicidad y los efectos adversos.

Los datos de entrada relativos al paciente para el sistema de planificación son imágenes de tomografía computada (TC), resonancia magnética nuclear (RMN), tomografía computada por emisión de fotón simple (SPECT) y tomografía por emisión de positrones (PET). Estas imágenes le llegan al planificador en distintos formatos; el sistema requiere aceptar distintos tipos de datos de entrada y darles un arreglo común para convertirlos en un único sistema de referencia. La capacidad del planificador al utilizar las imágenes debe ser independiente del origen de las mismas.

Los datos de entrada referentes a la unidad de tratamiento incluyen la presencia de un puente o brazo (*gantry*), una mesa o camilla, colimadores, cuñas virtuales y/o físicas (dinámicas o estáticas), banco de multiláminas, bloques y compensadores.

Los datos correspondientes al haz de irradiación pueden resumirse en:

- Obtención de datos: razón fuera del eje central (OCR), porcentaje de dosis en profundidad (PDD), factor de campo, factor de dispersión, factor bandeja, cuña
- Curvas de isodosis: lugar geométrico donde todos los puntos tienen igual dosis o los mismos valores de tasa de dosis sobre una sección plana de un medio irradiado
- Colimadores, bloques, cuñas, compensadores, multiláminas y sus respectivos índices de transmisión

La simulación del tratamiento incluye el manejo de datos del paciente tales como la información anatómica (se obtienen contornos manualmente o por tomografía) y la fusión de imágenes.

El cálculo de dosis se realiza a través de un algoritmo que consiste en un proceso para solucionar un problema matemático en un número finito de pasos que frecuentemente involucra repeticiones de algunos de sus pasos. En los sistemas de planificación de tratamientos los algoritmos deben ser capaces de predecir la dosis en cualquier punto dentro del paciente para poder decidir la aceptación o no de un tratamiento y/o la elección de un plan terapéutico alternativo.

Los algoritmos están basados en correcciones, usan parámetros medidos en agua y corrigen los datos para aplicar a un paciente en una situación específica.

En algunas ocasiones se precisan algunos elementos o dispositivos para la simulación del tratamiento. Entre ellos podemos mencionar:

- Bolus: es un material de densidad equivalente al tejido cuya función es aumentar la dosis en superficie y compensar la falta de tejido
- Compensadores: tienen el mismo efecto en la distribución de dosis que el bolus, pero mantienen la protección de la piel. Son de fabricación muy

laboriosa y los sistemas de planificación no calculan su distribución de dosis sin la toma de datos del haz bajo esta condición

- Cuñas y bloques

Los algoritmos basados en modelos matemáticos calculan la dosis en el paciente moldeando una representación del haz y su interacción en el medio. El haz primario emitido desde una posición dada de la fuente es subsecuentemente ‘contaminado’ por fotones dispersos y electrones desde el colimador primario y el filtro aplanador, mayoritariamente. La dosis en el paciente se incrementa desde la piel (dosis en la superficie) debido al incremento de partículas cargadas en movimiento hasta alcanzar una dosis máxima ‘ $d_{\text{máx}}$ ’ (región de *build up*) o al alcanzar el equilibrio electrónico. En los bordes del campo y en la interfase entre medios de diferente densidad no existe equilibrio electrónico.

El cálculo de dosis de haces de fotones puede estar:

- Basado en correcciones (RTAR, Clarkson, ETAR)

Emplea datos obtenidos en agua, calcula las correcciones del contorno y calcula correcciones por inhomogeneidad. Los datos medidos permiten un adecuado diseño de un plan de tratamiento. Dan mejor resultado para geometrías simples y es menos exacto en geometrías complejas (falta de tejido, inhomogeneidad). Son cálculos relativamente rápidos

- Basado en modelos (*pencil beam*, superposición/convolución, Monte Carlo). Desarrolla un modelo para cada haz y propaga el modelo del haz dentro del paciente. Buenos resultados con geometrías simples y complejas. Pocos sistemas usan este método y la velocidad de cálculo depende de la complejidad del modelo

La evaluación consiste en comprobar si la distribución de un tratamiento en particular tiene una cobertura adecuada del volumen blanco (PTV) y al mismo tiempo cumpla con las restricciones dosimétricas que requieran los tejidos que se desean proteger (órganos de riesgos). Para ello se emplean los siguientes instrumentos: curvas de isodosis, planos ortogonales y superficies de isodosis, datos estadísticos de distribución de dosis, histograma dosis volumen (DVH). La evaluación de la distribución de isodosis se realiza en general con imágenes transversas (cortes axiales). Es una manera sencilla y visualmente cómoda de estimar la distribución de dosis en el paciente.

El histograma dosis volumen (DVH), en su forma más simple, representa la frecuencia de distribución de dosis en un determinado volumen como el PTV o los órganos de riesgo. El DVH directo es útil para la determinación de la cobertura tumoral y los componentes de distribución de dosis en el tejido normal. El DVH acumulativo es útil para la determinación del volumen de un órgano que recibe dosis mayores a la dosis umbral.

Los DVH nos dan información de los ‘puntos fríos y calientes’ dentro de una estructura pero no su posición geométrica. En el momento de comparar dos o más, surgen los conceptos de indicadores biológicos: TCP (probabilidad de control tumoral) y NTCP (probabilidad de complicaciones del tejido normal).

9. CUARTO DE MOLDES Y ACCESORIOS

Las funciones de los accesorios de inmovilización y posicionamiento, así como un espacio destinado a cuarto de moldes, juegan un rol fundamental en todo el proceso de la radioterapia externa. Su existencia e integridad permiten:

- Asegurar que la región del paciente que se está tratando permanezca en la misma posición desde el inicio hasta el final de cada fracción terapéutica
- Asegurar que los campos inicialmente planificados y documentados en imágenes puedan reproducirse con exactitud en cada fracción
- Asegurar que si ha de tratarse más de un volumen de planificación, estos mantengan una posición relativa constante y reproducible entre cada uno
- Obtener contornos para planificar la teleterapia
- Facilitar la exactitud del ajuste de los campos individuales con respecto a la posición en el paciente y la unidad de tratamiento
- Fabricar protecciones y montar bloques o compensadores para cualquier campo, con el objetivo de proteger adecuadamente y en forma reproducible los órganos de riesgo
- Sintetizar y dar forma a materiales para fabricar bolus personalizados

Las técnicas de radioterapia evolucionan día a día, siempre orientadas a una mayor efectividad del tratamiento y considerando fuertemente la reducción en la probabilidad de ocurrencia de efectos adversos.

La utilización de dispositivos de inmovilización se tiene en consideración en todo el proceso de simulación, planificación y ejecución del tratamiento. Esto tiende a garantizar la efectividad, reduciendo incertezas y errores producto de un inadecuado posicionamiento periódico del paciente. Exactitud y precisión son dos conceptos imposibles de ser excluidos en el proceso de la radioterapia.

Frecuentemente, la inmovilización óptima del área que se desea irradiar se hace dificultosa. Depende en mucho de la comprensión del paciente y de su condición clínica (dolor, anatomía, ansiedad, limitaciones funcionales). Debe entenderse que aunque se logre un posicionamiento repetible del aspecto exterior del paciente, los órganos internos pueden no respetar esa condición debido a cambios fisiológicos inevitables (tránsito intestinal, variación del contenido sólido, líquido y gaseoso de las vísceras, contracción y relajación de esfínteres, respiración, llenado vesical).

Algunos dispositivos de inmovilización de uso cotidiano son:

- Moldes de yeso: al paciente se le colocan vendas de yeso y se espera a que se endurezcan (10-15 minutos) para retirar el molde. Si el molde se interpone en el campo de irradiación se hace una apertura o ventana para que el mismo no produzca radiación dispersa o ‘efecto bolus’

- Moldes y máscaras termomoldeables: los materiales termoplásticos son maleables a temperaturas entre 55-70 °C. Al enfriarse conservan la forma de la estructura sobre la que fueron colocados. Pueden ser fenestrados o no. Los efectos de estos inmovilizadores en el cálculo dosimétrico es despreciable en la práctica

- Moldes de poliuretano: combinando dos productos líquidos se obtiene una espuma expandible de rápida solidificación. En su constitución final la mayor parte del producto está compuesto por aire encerrado en pequeñas celdas de paredes muy finas, por lo que es despreciable su influencia en el cálculo de dosis

- Colchones de vacío: son bolsas de plástico resistente rellenas de bolitas de poliestireno. Luego de que el paciente se recuesta sobre este ‘colchón’ una bomba extrae el aire que contiene. El producto final es un molde rígido con la forma del paciente. Los efectos de los colchones de vacío en el cálculo dosimétrico también se considera mínimo y no se toma en cuenta en la práctica convencional

- Plano de tórax y mama
- Plano de cabeza; juego de apoyacabezas; máscaras termomoldeables
- Retractor de hombros
- Almohadas de distintas formas para miembros superiores, rodillas, pies

En el cuarto o taller de moldes se encuentra el crisol para fundir el metal con el que se construyen los bloques personalizados. Este metal no es plomo puro, uno de los más usados es una aleación de plomo, bismuto, estaño y cadmio, que funde a unos 70 °C. La presencia de plomo y cadmio hace que sea tóxico, principalmente cuando se lo manipula sin guantes o cuando se inhalan sus gases. El aparato de fundición siempre debe estar bajo una campana con extractor. Una opción no tóxica de este tipo de aleaciones es la que se obtiene con la combinación de bismuto, indio y estaño.

El cuarto de moldes también aloja la máquina que corta los bloques de poliestireno expandido (pantógrafo), los que luego van a ser llenados con la aleación que servirá de bloques de protección. También se encuentran todos los accesorios y herramientas necesarias para el montaje de los bloques sobre las bandejas acrílicas pertenecientes a cada equipo de tratamiento.

10. EQUIPOS Y PRINCIPIOS DE SIMULACIÓN

La radioterapia es un método de tratamiento de enfermedades principalmente oncológicas basado en el empleo de radiaciones ionizantes. En dicha modalidad se utilizan ciertos equipos como aceleradores lineales y unidades de ^{60}Co para administrar una dosis letal de radiación al volumen tumoral, respetando lo máximo posible la integridad de los tejidos sanos circundantes.

La simulación consiste en definir y localizar el volumen de tejido a irradiar, excluyendo a la vez la mayor proporción de las áreas que se desean proteger.

El procedimiento de simulación incluye el posicionamiento del paciente, seleccionar el tamaño del campo de tratamiento y las direcciones de las incidencias del haz.

La reproducibilidad de las relaciones geométricas entre la unidad de tratamiento y el blanco es esencial. Esta relación se describe utilizando un sistema de coordenadas estándar, un plano de referencia anatómico y el movimiento del equipo. Los planos de referencia utilizados son el sagital, transversal (axial) y coronal. Es esencial que la proyección de las líneas desde el sistema sea idéntica y coincidan con los ejes de rotación de la mesa y el *gantry*.

Existen dos tipos de simulaciones:

- Simulación convencional

Consiste en la delimitación de los campos de tratamiento con un equipo específico de rayos X, el simulador radioscópio. Consta de un equipo de rayos X de diagnóstico con un sistema electromecánico que reproduce la geometría y movimientos de los equipos de tratamiento. La información (o datos) es obtenida a través de imágenes fluoroscópicas por lo que los datos se convertirán en información bidimensional. La sala de simulación convencional dispone de al menos tres láseres de posicionamiento.

- Simulación virtual

Está basada en obtener imágenes de tomografía computada. Proporciona, en forma significativa, mayor información acerca del tamaño y localización del tumor. El paciente se debe ubicar e inmovilizar en el tomógrafo en la misma posición en que se aplicará el tratamiento.

En la radiografía digital el receptor de la imagen no es una película. Se utilizan, detectores de radiación que suministran una salida eléctrica proporcional a la intensidad de radiación. La señal de salida inicialmente se obtiene en forma analógica y luego es transformada a un formato digital. La imagen luego de un proceso informático es obtenida en un monitor de video.

La fluoroscopia digital y la convencional son estudios muy similares. La diferencia radica en que se ha añadido un ordenador, dos monitores de video y una consola operativa. En la consola de control se tienen teclas alfanuméricas para la introducción de los datos del paciente y la comunicación con el ordenador. Luego de obtenidas las imágenes pueden tratarse mediante el análisis de histogramas o manipulación en la región de interés.

En la tomografía computada (TC) se realizan cortes milimétricos transversales al eje cráneo-caudal con un grosor y espaciado determinado que depende del tamaño de la estructura a estudiar. Se pueden distinguir distintas densidades, pudiendo así reconocer diferentes estructuras. En los inicios cada corte o giro completo del tubo emisor de radiación requería 4,5 minutos, además de los 60 segundos indispensables para reconstruir la imagen. Actualmente, con los tomógrafos multicorte, se realizan dos cortes por segundo y las imágenes se reconstruyen instantáneamente.

El Principio de Hounsfield define el coeficiente de atenuación lineal y expresa la atenuación que sufre un haz de rayos X al atravesar el espesor de una sustancia dada. Al atravesar un material, un haz monoenergético de rayos X (compuesto por una sola longitud de onda) sufre un proceso de atenuación que matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$I = I_0 \times e^{-(\mu L)}$$

Si el material absorbente es el cuerpo humano el haz de rayos X pasa a través de estructuras materiales con distintos coeficientes de atenuación. Podemos considerar que el cuerpo humano está compuesto por un diverso número de elementos de igual tamaño, cada uno de un largo 'w' y cada uno con un coeficiente de absorción constante 'μ'. Si a estos coeficientes de atenuación se los denomina respectivamente $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, la ecuación anterior queda:

$$(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) \cdot w = \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

El resultado final de la reconstrucción es una matriz de números. Un procesador se encarga de asignar a cada número o rango de números un tono de gris adecuado. Los valores numéricos de la imagen de tomografía computada están relacionados con los coeficientes de atenuación, debido a que la atenuación que sufre el haz de rayos X al atravesar un objeto depende de los coeficientes de atenuación lineales locales del objeto.

Las técnicas de adquisición pueden ser:

- Primera generación de TC

Tienen geometría de haz paralelo (160 rayos en 24 cm). Tienen la capacidad adicional de rotar y hay poco efecto de dispersión

- Segunda generación de TC

Incorpora un arreglo de 30 detectores lineales. Abanico de 10 grados. Se reduce el tiempo de barrido. Se incrementa a 600 rayos por vista y 540 vistas (antes 180)

- Tercera generación de TC

Arreglo de al menos 750 detectores. La calibración del arreglo de detectores debe ser lo más homogénea posible

- Cuarta generación de TC

Arreglo de 1200 a 4800 detectores. La calibración del arreglo de detectores debe ser lo más homogénea posible

El primer tomógrafo helicoidal aparece en 1989, en paralelo con la tercera generación de estas máquinas. El sondeo se logra mediante el movimiento simultáneo del detector a lo largo de un marco circular y de la camilla. El tomógrafo helicoidal está dotado con un sistema de rotación constante para lo cual dispone de un sistema de roce o escobillas que mantienen la conexión eléctrica entre las fuentes de alimentación eléctrica, el tubo y los demás componentes que giran durante el disparo. Estos aparatos tienen la capacidad de realizar cortes axiales convencionales además de poder realizar exploraciones helicoidales. En el TC helicoidal se combinan el movimiento rotatorio del tubo y el movimiento de desplazamiento de la mesa durante el barrido, con lo que se consigue una adquisición volumétrica. Al factor de desplazamiento se le denomina *pitch factor* y sus componentes son:

$$\text{Pitch factor} = \frac{\text{Movimiento de la mesa (mm)}}{\text{Grosor de corte (mm)}} \times \text{Giro (segundos)}$$

La tomografía por emisión de positrones (PET) es un equipo de diagnóstico capaz de obtener imágenes metabólicas. La PET/TC es un sistema híbrido capaz de mostrar una imagen con la claridad anatómica de las imágenes del TC sumada a la información biológica y metabólica ofrecida por la PET.

La cámara PET consiste básicamente en unos anillos de detectores colocados alrededor del paciente, una electrónica y un sistema informático. En la simulación de radioterapia por PET/TC las imágenes obtenidas proporcionan información metabólica y morfológica vital al momento de la definición del volumen clínico de tratamiento.

11. SIMULACIÓN DE TUMORES GINECOLÓGICOS

Introducción

El aparato genital femenino presenta la particularidad anatómica de poner en comunicación una cavidad serosa con el exterior. Se puede subdividir en genitales internos y externos.

- Genitales externos: vulva (labios mayores, menores, himen, clítoris) y periné
- Genitales internos: vagina, útero, trompas de Falopio y ovarios

El drenaje linfático regional y retroperitoneal requiere de un análisis meticuloso a la hora de definir el estadio de la enfermedad, estimar el pronóstico y proponer la terapéutica. Sintéticamente, los grupos ganglionares que conforman las estaciones de drenaje linfático para los genitales femeninos se clasifican en superiores, inferiores, posteriores y anteriores.

Las neoplasias ginecológicas incluyen aquellas localizadas en el cuello uterino, endometrio, miometrio, trompas de Falopio, ovarios, vagina, vulva y uretra.

Mundialmente el cáncer de cuello uterino es la segunda neoplasia más común en mujeres, precedido por el cáncer de mama. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que actualmente hay más de 2 millones de mujeres en el mundo que padecen la enfermedad. Cada año se diagnostican 490.000 casos nuevos de cáncer cervicouterino; alrededor de 1.350 casos nuevos por día.

Los datos de la OMS indican que unas 650 mujeres mueren diariamente por cáncer de cuello uterino. Alrededor de la mitad de las mujeres portadoras de la enfermedad tienen entre 35 y 55 años de edad.

Procedimientos de Simulación

Los profesionales involucrados en la simulación del tratamiento radiante deben tener una base sólida en conocimientos de la anatomía topográfica y radiológica de los genitales femeninos.

El proceso de simulación ha pasado por diferentes etapas: simulación clínica (planificación semiológica), simulación con aparatos de rayos X diagnósticos, simuladores convencionales, tomografía computada (TC), resonancia magnética nuclear (RMN) y tomografía por emisión de positrones (PET).

En la actualidad las imágenes son enviadas vía red al sistema informático de un planificador de tratamiento capaz de reconstruir en tres dimensiones la anatomía radiológica del paciente. Sobre esta estructura virtual se delimitan los volúmenes blancos y los órganos de riesgo. Asimismo, se puede ubicar el isocentro en el área de interés, definir los campos de tratamiento y escoger las mejores incidencias de los haces.

La TC es la tecnología más utilizada en la simulación, los radioncólogos están familiarizados con ella y generan el tipo de imagen que aceptan los sistemas de

planificación terapéutica. Actualmente existe un gran desarrollo en la registración (fusión) de imágenes tales como TC/TC, TC/RMN y TC/PET.

La RMN ofrece mayor exactitud diagnóstica en patologías como el cáncer de cuello uterino, lesiones cerebrales y neoplasias de próstata. Esta mejor discriminación anatómica, la hace ideal para ser fusionada con la TC de simulación y aprovechar ambas imágenes para la planificación del tratamiento.

La PET elabora imágenes funcionales del metabolismo de diversas moléculas marcadas con algún radioisótopo. El marcador más difundido en oncología es la glucosa unida a ^{18}F para formar ^{18}F -Fluorodeoxiglucosa (FDG). Las imágenes metabólicas del PET ofrecen una pobre definición estructural, por lo que la fusión con la TC es de gran utilidad como herramienta de diagnóstico y planificación. La registración PET/TC ha demostrado particular valor en cáncer cervical, carcinoma escamoso de cabeza-cuello y tumores de pulmón.

Aunque existen TC dedicados para radioterapia (*CT simulators*), la mayoría de los centros de la región simulan en tomógrafos de uso diagnóstico. Estas máquinas vienen provistas con una mesa de superficie cóncava, por lo que debe adaptarse una mesa de superficie superior plana en aras de imitar a los equipos de tratamiento. Deben existir protocolos de control de calidad del TC que garanticen la horizontalidad de la mesa, la precisión de los láseres y la integridad morfológica de las imágenes (no deformación por parte del tomógrafo).

La posición del paciente y los accesorios de fijación utilizados serán idénticos a los que se utilizarán durante el curso terapéutico. La mayor sofisticación de la radioterapia (RT3D, IMRT, IGRT) exige una reducción de las probabilidades de errores de posicionamiento, lo que ha impulsado una verdadera industria de elementos para inmovilización.

No debe perderse de vista la posición repetible y confortable del paciente. De otro modo, se corre el riesgo de que aunque se inmovilice adecuadamente en la simulación no ocurra lo mismo durante el lapso que insuma cada fracción terapéutica.

Las pacientes con cáncer ginecológico requieren de una preparación para realizar la simulación que consiste en dieta blanda y lavado rectal la noche previa al procedimiento. Cada centro suele tener sus protocolos propios de simulación y posicionamiento, en esta circunstancia describiremos la preparación de un tratamiento en decúbito ventral (prono). Siempre se instruye a la paciente con las pautas necesarias para que el procedimiento culmine con éxito y sea reproducible en su ejecución posterior.

El colchón de vacío es un elemento de inmovilización óptimo para el decúbito prono. La paciente se recuesta sobre el colchón moderadamente inflado, una vez cómoda y relajada se moldea y se extrae el aire mediante una bomba. La alineación de la paciente respecto al inmovilizador se realiza con marcas sobre el mismo en coincidencia con marcas sobre la piel, ambas respetando lo que indican los láseres. En las marcas pintadas en la piel se adhieren pequeños elementos radiopacos, los que servirán de referencia en el momento de localizar el isocentro de referencia. Se adquiere un topograma para verificar la posición y alineación de la paciente, al igual que las marcas radiopacas. Los cortes tomográficos se adquieren cada 3-5 mm para obtener una

reconstrucción tridimensional de buena calidad. Ello también influye en la obtención virtual de radiografías reconstruidas digitalmente (DRR) de aceptable definición.

Terminado el procedimiento se realizan tatuajes puntuales sobre los sitios donde se ubicaron los marcadores radiopacos, puntos que definen el origen de coordenadas '0' para la futura planificación. Las imágenes de simulación son transferidas al planificador y se procede a la misma mediante el trabajo conjunto de médicos, físicos, dosimetristas y técnicos. La ubicación definitiva de la paciente respecto a la máquina de tratamiento, dependerá de los desplazamientos que se hagan en los ejes x-y-z respecto al origen de coordenadas '0'.

Definición de Volúmenes Blanco y Órganos de Riesgo

La demarcación de volúmenes blancos y órganos de riesgo es responsabilidad del radioncólogo, frecuentemente asistido por técnicos entrenados para tal propósito.

Las recomendaciones internacionales para el delineamiento de tumores y tejidos normales se encuentran en los estándares publicados por la *International Commission in Radiation Units and Measurement* (ICRU). Las normas referentes a la prescripción y reporte de tratamientos radiantes externos son el ICRU-50 (1993) y el ICRU-62 (1999).

Los estándares ICRU indican que los volúmenes en radioterapia externa se designan de la siguiente manera:

- GTV
 - Volumen Tumoral Grosero o Evidente (*Gross Tumor Volume*)
 - Es el tumor palpable o visible por el mejor medio que se disponga
- CTV
 - Volumen Blanco Clínico (*Clinical Target Volume*)
 - Incluye al GTV y sus probables territorios de diseminación (no visible), de acuerdo a su localización, variedad patológica, estadio y demás condiciones propias a cada neoplasia
- ITV
 - Volumen Blanco Interno (*Internal Target Volume*)
 - Contempla los probables cambios morfológicos y movimientos fisiológicos inevitables que hacen que el CTV varíe su localización anatómica temporal (respiración, llenado vesical, llenado gástrico, contenido fecal y gaseoso)
- PTV
 - Volumen Blanco de Planificación (*Planning Target Volume*)
 - Es un volumen estático en el espacio dentro del cual se encuentran el GTV, CTV e ITV. Dentro del PTV, estos pueden sufrir cambios de forma y posición pero nunca pueden exceder el volumen que contiene. El PTV también abarca las incertezas de posicionamiento

- OARs
 - Órganos de Riesgo (*Organs at Risk*)
 - Son aquellos tejidos y órganos normales vecinos a los volúmenes que se desean tratar. También debe tenerse en cuenta que cambian de forma, volumen y posición tanto entre como durante cada fracción terapéutica (*Planning Risk Volumes*, PRVs)

12. SIMULACIÓN DE TUMORES DE CABEZA Y CUELLO

Introducción

El consumo abusivo de tabaco y alcohol es el agente etiológico de un diverso número de afecciones para el ser humano, entre ellas el cáncer de cabeza y cuello. También contribuyen una pobre higiene oral, deficiencia de vitaminas (C, E, A) e infecciones virales (herpes simple, virus del papiloma humano).

Alrededor del 85% de las neoplasias de cabeza y cuello son carcinomas de células escamosas, nomenclatura anatomopatológica equivalente a carcinoma epidermoide y carcinoma pavimentoso.

La denominación general 'Cáncer de Cabeza y Cuello' alude a los tumores malignos originados en la nariz, senos paranasales, cavidad oral, nasofaringe, orofaringe, hipofaringe y laringe. También, a las metástasis linfáticas regionales de origen primario desconocido con histología de carcinoma.

Grupos Ganglionares Linfáticos del Cuello

- Nivel I

Ganglios submentonianos y submaxilares. Se encuentran en un compartimiento limitado hacia abajo por el músculo digástrico (vientre anterior y posterior) y el hueso hioides; hacia arriba por la rama horizontal de la mandíbula

- Nivel II

Ganglios yugulares superiores. Se extienden desde la base del cráneo por arriba hasta el hueso hioides por debajo

- Nivel III

Ganglios yugulares medios. Alojados desde el hueso hioides por arriba hasta el borde inferior del cartílago cricoides por debajo

- Nivel IV

Ganglios yugulares bajos. Abarcan desde el borde inferior del cartílago cricoides por arriba hasta la clavícula por debajo

- Nivel V

Ganglios del triángulo posterior. Limitados por detrás por el borde anterior del músculo trapecio, por delante por el borde posterior del músculo esternocleidomastoideo y por debajo por la clavícula

- Nivel VI

Ganglios del compartimento central. Se extienden desde el hueso hioides por arriba hasta el hueco supraesternal por debajo

Radioterapia

Los conocimientos en anatomía regional, semiología oncológica, radiología y patrones de diseminación neoplásica constituyen un factor primordial para la simulación, planificación (distribución de dosis) y ejecución del tratamiento radiante en tumores de cabeza y cuello.

Distintas técnicas de irradiación (2D, 3D, IMRT, IGRT) pueden ser aplicadas en dependencia de la extensión de la enfermedad, experiencia del personal y recursos tecnológicos del centro.

Mayormente se utilizan fotones con energías que varían entre la del ^{60}Co (1,25 MV) y 10 MV. Los electrones son útiles para tratar lesiones primarias o adenopatías superficiales, úlceras neoplásicas o como *boost*.

La radioterapia cumple un papel muy importante en el manejo de estas neoplasias, ya sea como tratamiento definitivo o combinado con cirugía y/o quimioterapia. Clásicamente, el curso terapéutico con radioterapia externa en cáncer de cabeza y cuello se describe en tres fases sucesivas de arreglos de campos:

- Fase I

Campos ‘extensos’ que incluyen el tumor primario y el drenaje linfático. Para tratar las fosas supraclaviculares se utiliza un campo anteroposterior. Para tratar el cuello y el tumor primario suelen emplearse dos incidencias laterales opuestas. Debe ponerse especial atención a que no existan brechas ‘subdosadas’ o superposición de irradiación en la zona de coincidencia de los campos superiores con el inferior (*matching*). Las dosis de esta fase rondan los 45-50 Gy

- Fase II

Primera reducción de campos para evitar la médula espinal. Excluido ese órgano de riesgo se continúa irradiando el resto hasta dosis entre 55-65 Gy

- Fase III

Boost al tumor primario y las adenopatías residuales para alcanzar dosis entre 68-72 Gy

Definición de Volúmenes Blanco

- GTV

Áreas comprometidas en forma grosera por el tumor primario (GTVp) y metástasis linfáticas (GTVn). Se definen por examen físico e imágenes.

- CTV1

GTVp + GTVn + margen de 8 mm (10 mm si existen adenopatías con extensión extracapsular)

- PTV1

CTV1 + margen de 5 mm (en las proximidades de órganos de riesgo, huesos y piel el margen puede reducirse a 1 mm)

- CTV2

CTV1 + ganglios sin enfermedad evidente pero con riesgo alto de recidiva. Abarca generalmente los ganglios del cuello superior homolateral; si existe afectación extracapsular se incluye el músculo esternocleidomastoideo hasta el límite cutáneo

- PTV2

CTV2 + margen de 5 mm (en las proximidades de órganos de riesgo, huesos y piel el margen puede reducirse a 1 mm)

- CTV3

CTV1 + territorios linfáticos ganglionares de irradiación electiva por ofrecer un escaso riesgo de recidiva

- PTV3

CTV3 + margen de 5 mm (en las proximidades de órganos de riesgo, huesos y piel el margen puede reducirse a 1 mm)

Órganos de Riesgo

Dosis de tolerancia en tratamientos de hasta 2 Gy por fracción

Órgano o sistema	Dosis ideales (Gy)	Dosis máximas permitidas (Gy)	Riesgo
Nervio óptico	≤ 50	≤ 55	Ceguera
Quiasma	≤ 50	≤ 55	Ceguera
Médula cervical	≤ 45	≤ 45	Mielitis
Tronco cerebral	≤ 55	≤ 55	Trastornos neurológicos
Plexo braquial	≤ 55	≤ 55	Trastornos neurológicos
Conducto auditivo interno	≤ 50	≤ 60	Sordera
Cristalino	≤ 07	≤ 10	Cataratas
Retina	≤ 45	≤ 55	Retinitis
Conjuntiva	≤ 50	≤ 55	Conjuntivitis
Glándula lagrimal	≤ 50	≤ 55	Conjuntivitis
Córnea	≤ 50	≤ 55	Queratitis
Hipófisis	≤ 40	≤ 40	Trastornos endocrinos
Músculo pterigoides	≤ 60	≤ 70	Trismus
Articulación temporomaxilar	≤ 60	≤ 70	Trismus
Parótida	≤ 26	≤ 70	Xerostomía

13. SIMULACIÓN DE TUMORES DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL

Introducción

Desde el punto de vista epidemiológico se atribuye un efecto etiológico para neoplasias del sistema nervioso central a los siguientes agentes:

- Agroquímicos y petroquímicos
- Microondas procedentes de teléfonos celulares. Este agente etiológico es discutido, ya que fue descartado por algunos estudios publicados. Sólo se ha encontrado cierta relación en personas que hacen un uso abusivo y extremo de este medio de comunicación (más de 2.000 horas anuales)
- Virus de Epstein Barr, relacionado al origen de linfomas cerebrales
- Radiación X
- Herencia genética

Ante la sospecha clínica de un tumor encefálico, la resonancia nuclear magnética (RMN) ofrece el medio diagnóstico más exacto de las imágenes médicas. La RMN es muy sensible en la discriminación de estructuras ricas en agua, tal como ocurre con los astrocitomas supraselares. Su alto contenido de agua expresa típicamente baja señal en secuencias T1 y alta señal en secuencias T2 y FLAIR. La RMN también puede adquirirse para el estudio de la irrigación tisular (angiorresonancia, venografía). La espectroscopia por RMN permite identificar la expresión anormal de algunas moléculas y así predecir el comportamiento de los tumores del sistema nervioso central. Puede predecir con significativa precisión el grado de malignidad de las neoplasias encefálicas.

La tomografía por emisión de positrones (PET) también permite sacar conclusiones respecto al metabolismo, grado de malignidad, flujo de nutrientes y estado de oxigenación de los tumores encefálicos y estructuras circundantes.

Aunque los estudios por imágenes ofrecen pistas muy valiosas acerca del comportamiento de los tumores, siempre se recomienda contar con el estudio anatomopatológico de un espécimen de biopsia para decidir la conducta terapéutica. La anatomía patológica, la inmunohistoquímica y los estudios genéticos permiten conocer definitivamente el grado de malignidad, la tendencia infiltrativa y la tasa de duplicación celular del material obtenido.

Las neoplasias microscópicamente parecidas al tejido nervioso normal, de lento crecimiento y tendencia al desplazamiento compresivo de las estructuras vecinas, se las designa con el grado I (astrocitoma pilocítico). En cambio, aquellas de crecimiento acelerado, infiltrantes, poco diferenciadas, con desarrollo de vasos anormales y necrosis, se califican con el grado IV (glioblastoma multiforme). Los grados II y III (astrocitoma y astrocitoma anaplásico) expresan un comportamiento intermedio entre las anteriores.

Hasta ahora, nos hemos referido a los tumores malignos primarios del sistema nervioso intracraneano. Pero debemos saber que las afecciones neoplásicas más comunes del encéfalo son las metástasis, producto de cánceres de diversos orígenes.

Simulación de Tratamiento Radiante

- Posición del paciente

El paciente en decúbito supino, torso y miembros en posición neutra y la nuca contenida en el apoyacabezas es la posición más frecuente. En circunstancias de tumores localizados en fosa posterior o médula espinal suele preferirse el decúbito prono con los accesorios diseñados a tal fin. Se deben retirar de la zona los objetos metálicos no definitivos (pendientes, prótesis removibles) y si el paciente acepta debe cortarse el pelo al ras

- Inmovilización

Apoyacabezas, máscara termomoldeable, fijación de hombros, almohada bajo rodillas para rectificar lordosis

- Origen de coordenadas '0'

Se define en la intersección de los láseres axial pasando a nivel de los arcos superciliares, sagital por el plano medio sagital y coronal por el hemiespesor craneal anteroposterior

- Referencias externas

Se colocan marcadores radiopacos en tres puntos pertenecientes al laser que define el plano axial; uno frontal en la intersección con el laser medio sagital y dos laterales en los puntos de intersección con el laser coronal. Un cuarto marcador se ubica en línea medio sagital a distancia de los demás, con objeto de controlar posibles desplazamientos laterales sobre el eje longitudinal

- Tratamiento de las imágenes

La tomografía computada (TC) se realiza preferentemente sin y con contraste endovenoso. Se adquieren cortes continuos de 2-3 mm de espesor. Transferidas al planificador de tratamiento, se fusionan con otras imágenes (TC previa, RMN, PET) de acuerdo a las necesidades

Radiocirugía

La cirugía estereotáxica es una intervención mínimamente invasiva que se vale de un sistema tridimensional de coordenadas para localizar estructuras anatómicas y lesiones pequeñas dentro del cuerpo. La radiocirugía es un tipo de procedimiento guiado bajo las mismas condiciones pero que alcanza las lesiones con radiación milimétricamente dirigida en vez de introducir elementos de ablación. Es una forma de radioterapia que enfoca rayos X de alta energía sobre un área pequeña del cuerpo. A pesar de su nombre, la radiocirugía es un tratamiento radiante y no un procedimiento quirúrgico. Lo único invasivo de la radiocirugía es la colocación de algunos marcos estereotáxicos que necesitan sujeción con tornillos a la tabla craneana externa.

La radiocirugía se ejerce con tres modalidades de irradiación:

- Haz de protones; terapia de captura de neutrones
- Gamma Knife: sistema que usa 201 pastillas de ^{60}Co dispuestas alrededor de un casco con orificios precisamente colimados dentro del cual se ubica la cabeza del paciente con el marco estereotáxico

- Los aceleradores lineales de uso convencional en radioterapia externa pueden ser adaptados para prácticas neuroquirúrgicas con la consiguiente necesidad de adquisición de un planificador para ese propósito. Una condición excluyente de la máquina es contar con un isocentro cuyas incertezas sean menores a 1 mm (precisión submilimétrica)

La radiocirugía es un método que permite tratar lesiones intracraneanas de pequeño volumen, diversas formas y ubicadas muy próximas a estructuras de riesgo. Se tratan frecuentemente tumores benignos como neurinoma del nervio acústico y adenoma de hipófisis, tumores malignos primarios o metastásicos pequeños, recidivas neoplásicas y malformaciones vasculares no abordables por cirugía tradicional.

Las etapas secuenciales del proceso radioquirúrgico son similares a las que se siguen para los demás tratamientos de radioterapia externa, pero precedidos por las exigencias de la estereotaxia:

1. Colocación del marco estereotáxico
2. Localización estereotáxica de un objetivo intracraneano a través de imágenes, generalmente fusión de RMN y TC
3. Delineación de volúmenes blanco y tejidos de riesgo
4. Planificación geométrica y dosimétrica del tratamiento
5. Ejecución terapéutica. Generalmente se dispensa toda la dosis en una sola fracción, pero existen protocolos de radiocirugía fraccionada en 2-5 sesiones

La radiocirugía es el producto del trabajo de un equipo interdisciplinario constituido por neurocirujanos, radioncólogos, físicos médicos, radiólogos, tecnólogos, enfermeros y personal de apoyo.

14. SIMULACIÓN DE TUMORES DEL TÓRAX

Anatomía de la Caja Torácica

El tórax es la parte del cuerpo humano que se encuentra entre la base del cuello y el diafragma. Contiene a la tráquea, bronquios, timo, pulmones, corazón, grandes vasos sanguíneos como el tronco pulmonar y la arteria aorta (ascendente, cayado, descendente), vena cava superior, cadenas ganglionares simpáticas, extensa red de vasos y ganglios linfáticos, vena ácigos mayor y menor, esófago y mediastino.

Tiene la forma de cono truncado o pirámide cuadrangular. Su pared posterior está formada por las vértebras dorsales, los arcos costales posteriores y los músculos dorsales. Las paredes laterales se constituyen por los arcos costales y los músculos intercostales. Hacia adelante las costillas se unen al esternón por los cartílagos condroesternales; suprayacente a las estructuras esqueléticas se fijan los músculos de la pared torácica anterior (intercostales, pectoral mayor y menor).

La caja músculo-esquelética del tórax brinda protección a los órganos vitales que contiene y participa activamente en el funcionamiento de los mismos.

Anatomía y Cáncer de Pulmón

Los pulmones son órganos esenciales del aparato respiratorio, es el sitio en que se realizan las importantes funciones de la hematosis. Sus dimensiones promedio son: altura 25 cm, diámetro antero posterior 16 cm, diámetro transverso de la base 10 cm el derecho y 7 cm el izquierdo. El pulmón tiene forma de un semicono, de eje mayor vertical, con su superficie convexa en contacto con la pared torácica. Presenta caras externa e interna, bordes posterior y anterior, vértice y base. El pulmón derecho consta de tres lóbulos: superior, medio e inferior. El pulmón izquierdo consta de dos lóbulos: superior e inferior. Ambos se encuentran recubiertos por la pleura visceral, que se extiende entre las fisuras que separan los lóbulos.

La tráquea entra en el mediastino superior, se bifurca a nivel de la quinta vértebra torácica para formar los bronquios primarios derecho e izquierdo, estos a su vez se ramifican formando los bronquiolos, terminando en los alvéolos. El hilio pulmonar contiene los bronquios, arterias y venas pulmonares. Los pulmones contienen una rica red de vasos linfáticos que pueden ser divididos en los siguientes grupos: intrapulmonares, broncopulmonares, ganglios del mediastino (superiores e inferiores) y supraclaviculares.

El cáncer de pulmón es la principal causa de mortalidad en los varones a partir de los 35 años y en las mujeres entre los 55 y 74 años de edad. A pesar de la investigación y los esfuerzos en educación pública, su incidencia y mortalidad sigue aumentando. La mortalidad por cáncer pulmonar en la población femenina se ha disparado más de un 400% en los últimos 30 años.

Los factores de riesgo para el cáncer de pulmón incluyen: tabaquismo, contaminación ambiental, raza y situación socioeconómica, geografía, algunos trabajos industriales, antecedentes familiares y personales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha identificado varias categorías de tumores, pero la gran mayoría (90%) está conformada por uno de los siguientes cinco tipos: carcinoma de células pequeñas, carcinoma epidermoide, adenocarcinoma, carcinoma de células grandes y neoplasias de celularidad mixta.

Pasos de la simulación convencional de tumores de pulmón:

- Explicar al paciente el procedimiento que se le va a realizar
- Pedir al paciente que suba a la mesa y se recueste en decúbito supino; si sus condiciones físicas lo permiten colocar sus manos por encima de la cabeza; uso de extensor de brazos, apoyacabezas bajo cuello y nuca
- Alinear al paciente por medio de los láseres
- Localizar por medio de fluoroscopia el campo o los campos a irradiar
- Marcar con plumón permanente el campo de tratamiento localizado
- Toma de radiografía por cada campo
- Durante la simulación se determina el tamaño de campo, profundidad, angulaciones del *gantry*, colimador si lo requiriere y distancia del tratamiento
- Cuando los campos y las radiografías han sido aprobadas por el radioncólogo, se le realizan al paciente una serie de tatuajes en el centro y las esquinas del campo anterior como a cada lado del paciente donde incidan los láseres laterales

Anatomía y Cáncer de Esófago

El esófago es una parte del tubo digestivo que tiene una longitud de 20 cm, se extiende desde la 6ª o 7ª vértebra cervical hasta la 11ª vértebra torácica y a través de él pasan los alimentos desde la faringe hasta el estómago. El esófago discurre por el cuello y por el mediastino posterior hasta introducirse en el abdomen superior, atravesando el diafragma. Está formado por: mucosa, capa muscular, esfínter esofágico superior y esfínter esofágico inferior.

Está irrigado por diferentes arterias según la porción que recorre. En el cuello está irrigado por las arterias esofágicas superiores, ramas de la arteria tiroidea inferior que procede de la subclavia. En el tórax, por las arterias esofágicas medias, por arterias bronquiales y las intercostales que son ramas directas de la aorta. En el abdomen, por las arterias esofágicas inferiores procedentes de las diafragmáticas inferiores, ramas de la arteria gástrica posterior.

Factores de riesgo para el cáncer de esófago: edad, género, herencia, tabaquismo e ingesta abusiva de alcohol, algunas sustancias dietéticas, enfermedad por reflujo y esófago de Barrett.

Los cánceres de esófago son típicamente carcinomas que se originan en el epitelio o en la superficie que recubre el esófago.

La mayoría de los cánceres esofágicos son carcinoma de células escamosas y adenocarcinomas. El cáncer de esófago ocupa el noveno lugar en el mundo; pero en los países en vías de desarrollo alcanza el quinto lugar. Su incidencia en Europa occidental es de 5 casos por cada 100.000 habitantes, mientras que en el sudeste de África y en otras áreas como Irán y China superan los 100 casos por cada 100.000 habitantes.

Pasos de la simulación convencional de cáncer de esófago:

- Antes de iniciar la simulación se le explica al paciente sobre el procedimiento que se le va a realizar
- Se recuesta al paciente sobre la mesa del simulador en decúbito supino con los brazos por encima de la cabeza y un soporte de cabeza y cuello bajo la nuca
- Cuando el tumor se encuentra a la altura del cuello y es palpable, se coloca sobre la piel del paciente alambre radiopaco para visualizarlo por medio de la fluoroscopia
- Se le administra al paciente contraste baritado vía oral para reconocer la luz del esófago
- Por medio de la fluoroscopia se localiza el área a irradiar y se delimitan los campos de tratamiento, angulaciones del *gantry* y colimador si fuera necesario
- Se toman radiografías por cada campo localizado (anterior y laterales) y el médico radioncólogo dibuja sobre las radiografías las protecciones requeridas

Simulación virtual

Se realiza en un tomógrafo simulador colocando al paciente en la misma posición y con los mismos accesorios que se utilizan en el tratamiento. Los cortes tomográficos se adquieren cada 3-5 mm en forma continua, lo que permite una mejor reconstrucción del volumen tumoral y los órganos de riesgo así como la obtención de radiografías reconstruidas digitalmente (DRR).

Con la utilización de la simulación en 3D, terapia conformada, IMRT e IGRT se ha requerido de mayor exactitud en la ubicación y fijación de los pacientes en el momento de la simulación virtual y del tratamiento. Por esta razón se han desarrollado diversos sistemas de inmovilización.

Pasos a seguir para la simulación virtual:

- Indicar al paciente el tipo de procedimiento que se le realizará
- Recostar al paciente en decúbito supino sobre el inmovilizador elegido; cuando se trate de colchón de vacío éste debe de estar inflado previamente
- Colocar al paciente en una posición cómoda y reproducible
- Se extrae el aire del colchón por medio de la bomba de vacío y se moldea a la forma del paciente
- Sobre las marcas pintadas en la piel del paciente se colocan unas marcas radiopacas (balines o perdigones) que nos servirán de referencia en el momento de realizar la planeación y la localización del isocentro del tratamiento
- Terminado el estudio se realizan tatuajes en donde se encuentran las marcas hechas con tinta indeleble en la piel del paciente, con el objeto de no perder las referencias que se utilizarán al momento del set up y ejecución terapéutica
- Las imágenes obtenidas se reconstruyen digitalmente para contornear en ellas el volumen blanco y los órganos de riesgo, se localiza el isocentro y se colocan los campos de tratamiento y por último las protecciones o multihojas necesarias para proteger los tejidos sanos

15. SIMULACIÓN DE TUMORES DE PRÓSTATA

Introducción

La próstata o glándula prostática, forma parte del sistema reproductor masculino. Se encuentra alojada en el compartimiento o nicho prostático, inmediatamente por debajo de la vejiga y rodeando la primera porción de la uretra. Está formada por dos lóbulos (izquierdo y derecho). Pesa unos 20-25 g y mide alrededor de 3 x 4 x 2.5 cm³ en el hombre adulto. Tiene forma de cono truncado invertido; la base en contacto con el aspecto inferior de la vejiga.

En la próstata se distinguen tres zonas:

- Zona de transición, correspondiente al 10% de la glándula, ubicada en la base y en relación con la uretra y la vejiga
- Zona central, correspondiente al 20% de la glándula, ocupa la base en relación con las vesículas seminales
- Zona periférica, correspondiente al 70% restante de la glándula

La zona de transición y periférica son las zonas donde se considera el sitio de origen del adenocarcinoma de próstata. Las arterias que irrigan la próstata nacen de la arteria iliaca interna o arteria hipogástrica. La linfa drena hacia los ganglios ilíacos externos, hipogástricos medios e inferiores, sacros laterales y prevesicales.

La glándula prostática tiene como función la producción de un líquido que se mezcla con el almacenado en las vesículas seminales y con los espermatozoides para formar el semen. Además produce sustancias de defensa contra las infecciones urinarias.

El cáncer de próstata es el segundo tumor más frecuente en el hombre, después del cáncer de pulmón. En todo el mundo se diagnostican unos 700,000 nuevos casos al año; lo que representa el 11.7% de todos los tumores masculinos. En los países en vías de desarrollo es el sexto tumor más habitual (después del cáncer de pulmón, estómago, hígado, esófago y colon).

De todos los tumores de la próstata los más frecuentes son los carcinomas, y de estos el adenocarcinoma, que corresponde a más del 90% de los tumores malignos del órgano. El adenocarcinoma se origina en la zona periférica, ocasionalmente se desarrolla de la zona de transición. Deriva de los acinos glandulares (carcinoma acinar); muy pocos, no más del 3%, lo harían de los conductos glandulares (carcinoma ductal). En el 85% de los casos es un carcinoma multifocal o extenso, en menos del 10% es uninodular.

El antígeno prostático específico (PSA) es una sustancia química producida por el tejido prostático. Se mide la concentración de PSA en la sangre para evaluar el riesgo que tiene un hombre de padecer cáncer; entre más alto es el nivel de PSA mayor es el riesgo de cáncer. El valor normal es de 0-4 ng/dl.

El método más común para corroborar la sospecha de cáncer prostático es la biopsia con aguja fina. Guiándose por ultrasonido transrectal, el médico utiliza una aguja de muestreo para tomar pequeñas muestras (cilindros) de tejido de la próstata a

través del recto. El sistema que se utiliza para clasificar la diferenciación de las glándulas se llama sistema Gleason. Este asigna grados que van del 1 al 5, cuanto más parecidas son las células analizadas a una célula normal, más bajo es el número.

Simulación de Tratamiento Radiante Externo

La simulación virtual es el procedimiento estándar para planificar el tratamiento radiante externo del cáncer de próstata localizado. El término virtual hace referencia a que la planificación se realiza sobre la reconstrucción tridimensional de imágenes, sin necesidad de la presencia física del paciente.

Los contornos externos y la anatomía interna sobre los que se desarrollará el proceso de planificación se obtienen a partir de las imágenes reconstruidas por algoritmos informáticos avanzados.

La tomografía computada (TC) es la fuente más común de obtención de imágenes para la reconstrucción anatómica y la planificación terapéutica. La delimitación de volúmenes blanco y órganos de riesgo se realiza sobre esa anatomía virtual; asimismo la localización de isocentros, determinación de incidencias y conformación de campos.

Actualmente se obtienen ‘empalmes’ de imágenes (registración o fusión) entre TC y resonancia magnética nuclear (RMN) para la conformación del volumen tumoral y los órganos de riesgo. Esta herramienta resulta particularmente útil en aquellos casos en que la RMN es más exacta que la TC para definir una estructura anatómica, como es el caso de la glándula prostática.

Aunque existen TC dedicados para radioterapia (*CT simulators*), la mayoría de los centros de la región simulan en tomógrafos de uso diagnóstico. Estas máquinas vienen provistas con una mesa de superficie cóncava, por lo que debe adaptarse una mesa de superficie superior plana en aras de imitar a los equipos de tratamiento. Deben existir protocolos de control de calidad del TC que garanticen la horizontalidad de la mesa, la precisión de los láseres y la integridad morfológica de las imágenes (no deformación por parte del tomógrafo).

La posición del paciente y los accesorios de fijación utilizados serán idénticos a los que se utilizarán durante el curso terapéutico. La mayor sofisticación de la radioterapia (RT3D, IMRT, IGRT) exige una reducción de las probabilidades de errores de posicionamiento, lo que ha impulsado una verdadera industria de elementos para inmovilización. Se pueden utilizar como sistemas de inmovilización mallas termoplásticas, colchones de vacío, sujetadores de piernas o espumas.

No debe perderse de vista la posición repetible y confortable del paciente. De otro modo, se corre el riesgo de que aunque se inmovilice adecuadamente en la simulación, no ocurra lo mismo durante el lapso que insuma cada fracción terapéutica.

Los pacientes deben consumir una dieta blanda el día previo al procedimiento y colocarse un micro enema para eliminar la materia fecal rectal. Media hora antes de la simulación el paciente toma medio litro de agua para mejor visualización de la vejiga en caso de no utilizar medio de contraste. La mayoría de los pacientes con cáncer de próstata son tratados en decúbito dorsal, por ser una posición técnicamente reproducible y bien tolerada.

Se coloca al paciente sobre el inmovilizador previamente elegido y diseñado, y en la posición determinada. Posteriormente, se alinea al paciente por medio del sistema de láseres. Después, se fija el posicionador con la barra de sujeción, y se pinta una línea perpendicular al posicionador en los muslos del paciente.

Sobre la piel se pinta una marca con plumón indeleble, se coloca sobre las marcas un balín que se utiliza como referencia en la planeación y al momento de localizar el isocentro de tratamiento. Se realiza un topograma para verificar la posición y alineación del paciente, al igual que los balines de referencia. Los cortes tomográficos se adquieren cada 2-3 mm en forma continua, lo que permite una adecuada reconstrucción del volumen tumoral y los órganos de riesgo; asimismo la obtención de una radiografía digitalmente reconstruida (DRR) de calidad aceptable.

La tomografía se puede adquirir sin y con contraste; las imágenes contrastadas permiten discriminar mejor los ganglios linfáticos de los vasos sanguíneos y la próstata y vesículas seminales del recto y la vejiga. Cabe señalar que la fase contrastada se utilizará únicamente para contornear volúmenes y órganos de riesgo, no para los cálculos dosimétricos.

Terminado el estudio, se realizan tatuajes en donde se encuentran las marcas hechas con plumón indeleble sobre la piel. Los tatuajes permiten no perder el '0' de referencia, que es el punto de partida para la localización del isocentro de tratamiento desplazando al paciente en las coordenadas 'x', 'y', 'z'.

Definición de Volúmenes Blanco y Órganos de Riesgo

La demarcación de volúmenes blanco y órganos de riesgo es responsabilidad del radioncólogo, frecuentemente asistido por técnicos entrenados para tal propósito.

Las recomendaciones internacionales para el delineamiento de tumores y tejidos normales se encuentran en los estándares publicados por la *International Commission in Radiation Units and Measurement* (ICRU). Las normas referentes a la prescripción y reporte de tratamientos radiantes externos son el ICRU-50 (1993) y el ICRU-62 (1999).

Los estándares ICRU indican que los volúmenes en radioterapia externa se designan de la siguiente manera:

- GTV
 - Volumen Tumoral Grosero o Evidente (*Gross Tumor Volume*)
 - Es el tumor palpable o visible por el mejor medio que se disponga
- CTV
 - Volumen Blanco Clínico (*Clinical Target Volume*)
 - Incluye al GTV y sus probables territorios de diseminación (no visible) de acuerdo a su localización, variedad patológica, estadio y demás condiciones propias a cada neoplasia
- ITV
 - Volumen Blanco Interno (*Internal Target Volume*)

- Contempla los probables cambios morfológicos y movimientos fisiológicos inevitables, que hacen que el CTV varíe su localización anatómica temporal (respiración, llenado vesical, llenado gástrico, contenido fecal y gaseoso)
- PTV
 - Volumen Blanco de Planificación (*Planning Target Volume*)
 - Es un volumen estático en el espacio dentro del cual se encuentran el GTV, CTV e ITV. Dentro del PTV, estos pueden sufrir cambios de forma y posición, pero nunca pueden exceder el volumen que contiene. El PTV también abarca las incertezas de posicionamiento
- OARs
 - Órganos de Riesgo (*Organs at Risk*)
 - Son aquellos tejidos y órganos normales vecinos a los volúmenes que se desean tratar. También debe tenerse en cuenta que cambian de forma, volumen y posición, tanto entre como durante cada fracción terapéutica (*Planning Risk Volumes, PRVs*)

16. SIMULACIÓN DE RADIOTERAPIA EN ONCOLOGÍA PEDIÁTRICA

Tema Principal: Tumores del Sistema Nervioso Central

Los tumores del sistema nervioso central (SNC) en paciente pediátricos incluyen: astrocitoma, oligodendroglioma, ependimoma, meduloblastoma, germinoma, retinoblastoma, astrocitoma pilocítico, linfomas, meningiomas, schwannomas, neurofibromas y metástasis.

En general, la cirugía seguida de quimioterapia es el tratamiento de elección. Los efectos colaterales de la radioterapia hacen que su uso se acote estrictamente a indicaciones donde su ganancia terapéutica sea significativamente apreciable. Entre los efectos adversos de la radioterapia se encuentran: alteraciones funcionales y estructurales, compromiso del coeficiente intelectual, retraso del aprendizaje, alteraciones de la conducta, trastornos endocrinos, hipoplasia músculo-esquelética. Existe una gran controversia acerca de las dosis límite para la probabilidad de ocurrencia de efectos a largo plazo y déficit funcionales, pero una dosis aproximada de 20 Gy estaría en el límite de inducción de secuelas a largo plazo.

Simulación de Tratamiento Radiante en Neoplasias del SNC

Frecuentemente y dependiendo de la edad y comprensión del paciente, se le debe anestésiar o sedar durante la simulación y en cada fracción del curso terapéutico. Los recursos de inmovilización deben adaptarse a los requerimientos propuestos por el equipo de anestesia para permitir el pasaje de tubos hacia la cavidad oral y el relevamiento continuo de signos vitales. Se están probando técnicas de hipnosis para reducir la compleja logística que requiere el uso diario de anestesia. Dependiendo de las posibilidades se utilizarán inmovilizadores tipo cuñas alpha ‘calientes’, cuñas alpha ‘frías’, máscaras termomoldeables, colchones de vacío y guías estereotáxicas.

La mayor parte de los servicios de radioterapia no cuentan con inmovilizadores pediátricos específicos. Para que el niño adopte una posición cómoda, reproducible y compatible con los requerimientos de la anestesia, se requiere generalmente de soportes de cuello personalizados diseñados en el propio departamento.

Conviene fijar el maxilar inferior y registrar en forma clara distancias de verificación periódica entre diversos puntos tatuados, por ejemplo entre la barbilla y ángulo de Louis. La flexión del cuello debe ser tal que la línea cantomeatal sea perpendicular a la mesa. La posición elegida para prácticamente todas las técnicas es el decúbito supino.

Existen protocolos de radioterapia neurológica pediátrica que exigen la irradiación espinal total. Tratar en un solo campo toda la extensión de la columna vertebral, incluido el canal medular sacro, suele ser un desafío por las limitaciones de las máquinas. Por ejemplo, alcanzar en el isocentro longitudes de campo de 50 cm o más no es posible en la mayor parte de los equipos. Si la mesa no admite ascender lo suficiente como para lograr abarcar esa dimensión en una incidencia posteroanterior única, se deberá recurrir a arreglos de campos contiguos con el riesgo de superponerlos (sobredosar) o dejar brechas entre ellos (subdosar).

Para tratar el contenido encefálico completo (irradiación cráneo total) es recomendable la simulación tomográfica con adquisición de imágenes continuas cada 2-5 mm. La conformación de bloques sobre una radiografía lateral convencional exige de mucho conocimiento de anatomía radiológica y experiencia profesional para abarcar realmente todo el encéfalo.

El problema es aún mayor en aquellos tratamientos que requieren la irradiación craneoespinal total. A lo anterior se agrega la complejidad de lograr una continuidad dosimétrica homogénea entre los campos laterales del tratamiento encefálico y la incidencia posteroanterior del campo espinal.

Las marcas definitivas sobre la máscara y los tatuajes epidérmicos deben permitir una alineación fácilmente repetible entre la cabeza y el torso para evitar posibles desviaciones del eje longitudinal, rotaciones del tronco e inclinaciones laterales de la cabeza. Mientras mejor se definan los isocentros en la simulación, menor será la necesidad de duplicar marcas externas. Ello conduce a una reducción de la probabilidad de cometer errores de localización durante el tratamiento.

Los sistemas de inmovilización suelen no ser adecuados para su colocación en los equipos de resonancia magnética nuclear (RMN). Por eso, si se va a utilizar la fusión de imágenes como herramienta de marcación de volúmenes, debe ponerse especial atención al posicionamiento del paciente tanto en el tomógrafo simulador como en la RMN.

Otros Tumores Pediátricos Relevantes en Radioterapia

- Retinoblastoma

Es una neoplasia de localización bilateral en un 20-30% de los casos. El objetivo fundamental es la supervivencia y de forma secundaria mantener la visión y evitar la hipoplasia de la órbita. La dosis habitual es de 42-44 Gy en fracciones diarias de 1.8 Gy. El tratamiento requiere anestesia y alta inmovilización con máscaras termoplásticas. La dosimetría puede ser simple o muy compleja dependiendo de la forma y localización del tumor.

- Tumor de Wilms

Son tumores de origen renal. Tienden a diseminarse por siembra en la cavidad abdominopelviana.

Las técnicas de irradiación suponen campos amplios con una adecuada protección de estructuras óseas, pélvicas y del riñón remanente. Existen también técnicas limitadas al área quirúrgica (lecho tumoral). La dosis más común ronda entre 10-20 Gy en fracciones de 1.8 Gy y las incidencias son generalmente anteroposterior y posteroanterior.

El riñón remanente se protege con un bloque 'isla' ubicado dentro de los campos. Su correcta colocación dependerá de una óptima inmovilización del paciente (tatuajes claramente visibles y si es posible uso de cuñas alpha). La tomografía computada (TC) debe adquirirse con un espesor de corte que permita delimitar bien todo el riñón para que la protección sea efectiva.

Cuando se utilizan colimadores multihoja no siempre es posible hacer una 'isla' y es necesario recurrir a una irradiación segmentada.

Cuando el paciente requiera irradiación pulmonar profiláctica debe tenerse cuidado con la yuxtaposición a nivel del diafragma.

Conclusiones

- La terapia con radiaciones en pediatría requiere de procedimientos muy cuidadosos de inmovilización y localización
- Frecuentemente la anestesia es imprescindible para cada sesión
- La toxicidad a largo plazo es un factor a tener en cuenta en la justificación de su uso
- El posicionamiento debe ser lo más cómodo posible para favorecer el control de la reposición
- Las técnicas sofisticadas en la enfermedad localizada permiten una mayor precisión en la distribución de dosis
- La radioterapia guiada por imágenes (IGRT), especialmente la tomoterapia, representa una técnica cómoda para el paciente, que mejora la repetitividad de las sesiones y minimiza los riesgos de las yuxtaposiciones de campos

17. SIMULACIÓN DE LINFOMAS Y APARATO GASTROINTESTINAL

Introducción

La simulación de tratamiento radiante es un proceso que involucra diversos procedimientos de los cuales depende la correcta irradiación de un paciente portador de una patología neoplásica.

La simulación convencional (radioscópica o 2D) es una práctica que requiere de un profundo conocimiento de anatomía normal, semiología oncológica e interpretación radiológica de imágenes bidimensionales. En el simulador universal radioscópico el médico radioncólogo se vale de referencias óseas, medios de contraste y marcas externas para definir campos terapéuticos, incidencias y bloques de protección. El cálculo dosimétrico del plan terapéutico en general depende de algoritmos de planificación 'relativamente simples'.

La simulación tomográfica con reconstrucción tridimensional (virtual o 3D) permite realmente ver los tejidos afectados y los órganos de riesgo. Requiere de conocimientos imagenológicos derivados de imágenes adquiridas en un tomógrafo computado (TC). Asimismo, el radioncólogo debe formarse en la interpretación de imágenes registradas (fusionadas) con otros medios diagnósticos como resonancia magnética nuclear (RMN) y tomografía por emisión de positrones (PET). La planificación del tratamiento será el producto de combinar las imágenes reconstruidas con complejos medios informáticos dedicados a tal fin (sistemas de planificación terapéutica o TPS).

Sea cual fuere el método de planificación, todo depende y comienza con un adecuado posicionamiento del paciente. El mismo debe ser confortable, simple, rápido en su implementación diaria, interpretable por todo el equipo terapéutico, reproducible e inalterable a lo largo del curso terapéutico completo.

La descripción de los equipos de simulación y su proceso se encuentran en la sección 11 de este compendio.

Linfomas

Son neoplasias del tejido linfoide y pueden manifestarse en cualquiera de sus localizaciones. Existen diversos tipos de linfomas y su clasificación depende de su origen, características y localización. El pronóstico, así como el tratamiento, dependen del tipo de linfoma. Se clasifican en linfomas no Hodgkin (LNH) y linfomas Hodgkin.

- Linfoma o Enfermedad de Hodgkin (EH)

Abarca un grupo de patologías menos frecuentes que el LNH; afecta principalmente a personas jóvenes. Se extiende de manera ordenada y predecible, por ello la estadificación inicial es de gran importancia para decidir el o los tratamientos.

- Linfoma no Hodgkin

Su diseminación es menos previsible que en la EH, en la mayoría de los pacientes se encuentra diseminado al momento del diagnóstico. La estadificación inicial resulta útil para deducir el pronóstico pero no tan importante para decidir el tratamiento.

La radioterapia en linfomas ha evolucionado desde campos amplios que abarcaban grandes extensiones anatómicas, a campos limitados dirigidos sólo a las áreas primariamente afectadas por la enfermedad.

La radioterapia exclusiva como tratamiento radical ha quedado reservada para la EH ganglionar de escaso volumen y limitada a un solo grupo linfático. En el resto de los casos y en la mayoría de los LNH la radioterapia es el tratamiento estándar para la consolidación de respuesta completa a quimioterapia, tratamiento de la enfermedad residual y una excelente opción paliativa en la enfermedad avanzada.

Tumores gastrointestinales

- Cáncer de esófago

Es el noveno cáncer en frecuencia en todo el mundo. El carcinoma escamoso es el más frecuente en zonas endémicas (Asia, Sur y Este de África y Norte de Francia), mientras que el adenocarcinoma es más común en las zonas no endémicas (Norteamérica y Europa occidental). Es una neoplasia más frecuente en hombres que en mujeres; el carcinoma escamoso es más común en la raza negra y el adenocarcinoma en la raza blanca. El carcinoma escamoso se asocia con hábitos tóxicos como el abuso de tabaco y alcohol.

Las opciones terapéuticas van a depender de la localización del tumor, así como del grado de extensión de la enfermedad. Cuando la enfermedad es resecable la cirugía es la terapia estándar. En esófago cervical, ubicación generalmente no operable, la combinación de radioterapia y quimioterapia concurrente es la primera opción terapéutica con intención radical. En casos de necesidad de paliación local por obstrucción la combinación de expansores endoluminales (*stents*) y radioterapia es de uso frecuente.

La ubicación del esófago torácico, profundo en el mediastino, hace que energías de fotones de 6-18 MV sean las más adecuadas para tratamiento radiante externo. En radioterapia tridimensional conformada (RT3D) generalmente se comienza con incidencias anteroposterior y posteroanterior sobre un PTV1 que abarca el tumor esofágico (con márgenes) y los territorios regionales primarios de drenaje linfático. Le sigue una segunda etapa en la que se combinan arreglos de incidencias oblicuas para tratar el PTV2, formado por el tumor primario y sus márgenes.

Si el tratamiento radiante es con intensidad modulada (IMRT) se recomienda el uso de 5-7 incidencias equiespaciadas. Debe ponerse especial atención a las dosis que reciben los pulmones, dado que con esta técnica puede ocurrir inadvertidamente que grandes volúmenes de parénquima reciban bajas dosis aumentando el riesgo de fibrosis difusa.

- Cáncer de estómago

El pronóstico de los pacientes con cáncer de estómago depende de la extensión del tumor e incluye tanto la afectación ganglionar como la extensión del tumor directa más allá de la pared gástrica. El grado tumoral también puede suministrar cierta información sobre el pronóstico. El cáncer de estómago localizado tiene tasas curativas de un 50%. La cirugía radical representa el primer paso terapéutico con ese objetivo. No obstante, continúa siendo elevada la incidencia de recidiva local y afectación de ganglios linfáticos regionales. Por ello, la combinación de radioterapia y quimioterapia concurrentes se ha transformado en el tratamiento adyuvante estándar.

En radioterapia externa se utilizan preferentemente haces de fotones de alta energía (6-18MV) solos o combinados entre sí. Si el tratamiento es RT3D, dado que el volumen de tratamiento es grande, se intentan utilizar diferentes incidencias con el fin de proteger lo más posible los órganos de riesgo (riñones, hígado, médula espinal, asas intestinales).

Si el tratamiento radiante es con intensidad modulada (IMRT) se recomienda el uso de 5-7 incidencias equiespaciadas.

- Cáncer de páncreas

El cáncer de páncreas está entre los cinco tipos de neoplasias que causan más muertes en el mundo desarrollado. Menos de un 5% de los pacientes permanecen vivos transcurridos los 5 años desde su diagnóstico. Su incidencia aumenta exponencialmente con la edad y existen factores ambientales y hábitos de vida que se vinculan con su desarrollo (tabaquismo, bebidas alcohólicas, consumo elevado de café, dieta escasa en frutas y verduras).

La cirugía sólo es posible en un 10-25% de los casos. La radioterapia se emplea de manera posoperatoria o exclusiva en el caso de ser inoperable. Otra opción terapéutica paliativa es la quimioterapia sistémica.

Los principios generales de tratamiento radiante son los mismos que para cáncer gástrico.

- Cáncer colorrectal

Incluye cualquier tipo de neoplasia del colon, recto y apéndice cecal. En los países desarrollados es la segunda causa de mortalidad por cáncer.

Aproximadamente el 50% de los tumores se localizan en el recto y el otro 50% se distribuyen de forma desigual por las diferentes regiones del intestino grueso (sigma, ciego y colon). La mayoría de los tumores son adenocarcinomas.

La radioterapia adquiere relevancia en el tratamiento radical del cáncer de recto. Existen diversos esquemas de tratamiento preoperatorio, estándar actual reconocido. Se proponen fraccionamientos que dispensan desde 5 hasta 28 fracciones, exclusivos o combinados con quimioterapia. La radioterapia también forma parte integral del tratamiento posoperatorio de estas neoplasias.

El tratamiento radiante incluye la mayor parte del contenido pelviano, desde el promontorio hasta los isquiones y desde la concavidad sacra hasta el pubis.

Dentro de lo posible, se diseñarán protecciones para la región vesical anterosuperior y para las asas delgadas intrapelvianas.

18. SIMULACIÓN DE RADIOTERAPIA EN CÁNCER DE MAMA

Introducción

El cáncer de mama en la mujer, debido a su frecuencia y la repercusión que tiene en la vida de las mujeres afectadas y en los sistemas sanitarios, constituye un problema mayor de la salud pública.

Es el cáncer más frecuente en la mujer. Según un informe de Abril 2011 de la *American Cancer Society* y GLOBALCAN 2008 publicado por la *International Agency for Research on Cancer* (IARC) que se nutre de los registros y fuentes de 20 regiones del mundo en los 5 continentes, el carcinoma mamario ocupó el 23% (1.380.000 casos) de todos los nuevos cánceres diagnosticados y fue causante del 14% (458.400) de las muertes por cáncer en el año 2008.

Su incidencia varía entre países y áreas según la historia reproductiva y posibilidad de diagnóstico precoz sobre la población local. Aunque su incidencia se ha incrementado en los países desarrollados en los últimos años del siglo XX debido a factores de riesgo (nuliparidad, edad tardía de la primera gestación, escasa lactancia, exposición a terapia estrogénica, obesidad, falta de actividad física, tabaco) y programas de *screening*, su tendencia para los próximos años es la disminución de la incidencia consecuencia de la reducción de los factores de riesgo.

A pesar de la elevada incidencia en los países desarrollados (América del Norte y Europa), la tasa de mortalidad ha disminuido, marcando grandes diferencias frente a países en desarrollo. El diagnóstico precoz mediante mamografías proporciona mayor número de opciones de tratamiento y salva vidas, aunque tiene un coste económico no factible en países en desarrollo.

El pilar del tratamiento curativo del cáncer de mama es la cirugía. La radioterapia reduce el riesgo de recidiva en la glándula restante, la pared torácica y/o los ganglios linfáticos regionales. La cirugía conservadora de la mama consiste en extirpar el tejido tumoral local con un margen de tejido glandular sano. Sus opciones incluyen la tumorectomía (lumpectomía) y la cuadrantectomía, pretendiendo mejorar los resultados cosméticos respecto a la mastectomía (extirpación de toda la mama). La cirugía conservadora seguida de radioterapia tiene resultados en control local y regional similares a la mastectomía radical. Con un sentido también cosmético, la mastectomía admite gestos reconstructivos inmediatos o diferidos. En casos de carcinomas local o regionalmente avanzados la mastectomía debe complementarse con radioterapia adyuvante.

La cirugía del cáncer mamario incluye la investigación de los ganglios linfáticos regionales, básicamente los ganglios axilares. Existe una técnica para detectar y disecar la primera estación ganglionar de drenaje linfático mamario denominada búsqueda del ganglio centinela. Si en este ganglio o grupo ganglionar no se identifican metástasis, concluye la cirugía axilar. Si por el contrario existen metástasis en el centinela, debe programarse la disección axilar más extensa (al menos 10 ganglios). Si el equipo quirúrgico no cuenta con los medios o la experiencia para la búsqueda del ganglio centinela, directamente procede a la linfadenectomía axilar clásica.

Radioterapia

La radioterapia externa es el método más común para irradiar pacientes con cáncer de mama. La extensión del tratamiento radiante depende del estadio de la enfermedad y del tipo de intervención quirúrgica realizada.

En los casos de cirugía conservadora, con escasa carga tumoral mamaria y axila libre de metástasis, el tratamiento radiante exclusivo de la mama restante es suficiente. Suele administrarse una dosis adicional al cuadrante primariamente afectado (*boost*). Si el tumor fuese voluminoso y/o la axila estuviese afectada, debe contemplarse la irradiación de esta última.

En los casos de mastectomía, con escasa carga tumoral mamaria y axila libre de metástasis, el tratamiento quirúrgico no requiere de radioterapia adyuvante. Contrariamente, si la enfermedad se encuentra en estadios locorregionalmente avanzados, se irradiará la pared torácica y los territorios de drenaje linfático (axilares, supraclaviculares, mamaria interna).

La radioterapia posquirúrgica dará inicio cuando la zona intervenida haya cicatrizado en forma completa. Si es necesario la administración adyuvante de quimioterapia, la radioterapia se diferirá hasta finalizada esta.

Simulación

Se han descrito diversas técnicas para los procedimientos de simulación en esta patología, tanto destinados a la mama, la pared torácica y los territorios linfáticos.

- Medios Inmovilización

Plano de mama (*breast board*), cuñas o bolsa de vacío. Cuando no se usan los recursos propios de los inmovilizadores industriales para sujetar miembros y cabeza, se recomienda construir un accesorio que permita sostener las manos elevadas por encima de la cabeza.

- Posición del paciente

- Decúbito supino
- Brazos dispuestos por encima de la cabeza. Esta posición desplaza la mama en sentido craneal alejándola del corazón y los pulmones, pero a veces resulta inadecuada para tratar la región axilosupraclavicular por la formación de pliegues a dicho nivel. En ese caso debe sostenerse el brazo a unos 90° en relación al tórax y lo mismo el antebrazo respecto al brazo
- Cabeza girada hacia el lado contrario a la mama afectada

- Coordenadas '0' en simulador tomográfico ('cero TC')

Se ubican en un plano axial a nivel del apéndice xifoides (o más abajo si fuera necesario para evitar la coincidencia con las mamas) definido por la intersección del láser longitudinal en línea media y los láseres laterales a una altura aproximada del hemiespesor torácico (línea medio-axilar)

- Referencias cutáneas

Se colocan marcadores radiopacos en cuatro puntos de referencia, los tres cuya intersección ortogonal definen el ‘cero TC’ (uno en línea media y dos laterales a la misma altura) y un cuarto en línea media en un plano superior, con el objeto de controlar desplazamientos del eje longitudinal. Adquirida la TC, deben marcarse de forma indeleble (tatuaje)

- Otras referencias

Sobre el inmovilizador empleado (cuña, colchón de vacío) se rotularán marcas laterales y en el eje longitudinal, indicando su posición cuando el paciente está en el centro de coordenadas de referencia (‘cero TC’)

Planificación

Las imágenes obtenidas en la TC son transferidas al planificador de tratamiento radiante (TPS). El equipo de físicos obtendrá las nuevas coordenadas que ubicarán al paciente en relación a la máquina de tratamiento (desplazamientos respecto al ‘cero TC’). Asimismo, definirán las incidencias adecuadas para el tratamiento de la mama, pared torácica y cadenas linfáticas. Diseñarán los bloques de protección y obtendrán los cálculos dosimétricos. Finalmente, el cuerpo médico aprobará el plan final para pasar a la etapa de *set up* y ejecución terapéutica.

La mayoría de los planes contemplan incidencias tangenciales para tratar el hemitórax blanco (mama y pared torácica). En tanto, la región axilosupraclavicular suele tratarse con incidencias anteroposteriores y posteroanteriores con algunas variantes sutiles de angulación del *gantry*.

19. SIMULACIÓN DE RADIOTERAPIA EN SARCOMAS

Introducción

Los sarcomas de partes blandas son tumores malignos de origen mesenquimal. Afectan al tejido conectivo esquelético y extraesquelético, incluyendo el sistema nervioso periférico. Son neoplasias de gran diversidad histopatológica, origen anatómico y conducta biológica. La colaboración multidisciplinaria en su manejo, desde el diagnóstico hasta el tratamiento, es fundamental.

El 50% de los sarcomas se localizan en las extremidades, un 40% en el tronco y retroperitoneo, el 10% restante en topografía cervical y cefálica.

En su etiopatogenia se suele atribuir una asociación con probables agentes etiológicos tales como:

- Factores ambientales: traumatismos, carcinógenos, radiaciones, virus oncogénicos
- Factores inmunológicos
- Factores genéticos: enfermedad de Von Recklinghausen, síndrome de Gardner

Los sarcomas tienen la característica de ser localmente invasivos con un patrón de diseminación sistémica predominantemente hematógeno. Las metástasis ganglionares linfáticas son infrecuentes.

Los criterios de estadificación incluyen el volumen tumoral, estado ganglionar, presencia de metástasis a distancia y grado de diferenciación.

Los grados de diferenciación de estos tumores se clasifican en:

- GX. Grado que no puede ser determinado
- G1. Bien diferenciado
- G2. Moderadamente diferenciado
- G3. Pobremente diferenciado
- G4. Indiferenciado

El tratamiento primario de los sarcomas de partes blandas es la cirugía. Dependiendo del estadio, se puede combinar con radioterapia, quimioterapia o ambas. Por lo tanto, el manejo de un paciente con sarcoma de partes blandas debe tener un enfoque multidisciplinario.

Simulación de Tratamiento Radiante de Sarcomas de Extremidades

El posicionamiento e inmovilización dependerá de la localización de la enfermedad en cada uno de los segmentos anatómicos de cada miembro. En todos los casos debe evitarse la irradiación circunferencial completa del miembro. Siempre debe excluirse una franja de tejido opuesto al lecho quirúrgico para permitir el flujo linfático.

Caso contrario, se producirá un bloqueo del drenaje con la consiguiente inducción de edema distal al área tratada.

Los miembros superiores se suelen simular y tratar en decúbito supino con ayuda de elementos de inmovilización como planos inclinados y accesorios para la fijación repetible del brazo respecto al tórax y del antebrazo respecto al brazo.

Los miembros inferiores se inmovilizan de acuerdo a la ubicación del tumor o su lecho quirúrgico. Si se localiza en la musculatura anterior del muslo es conveniente la posición en decúbito supino con el muslo en abducción, rodillas separadas y talones juntos (posición en ‘piernas de rana’). Así se puede tratar el compartimiento anterior mientras se excluyen los músculos medios y posteriores. Si debe tratarse la región posterior los decúbitos lateral o prono son los más convenientes. Para simular las piernas o los pies cualquiera de las opciones anteriores puede ser utilizada en dependencia de la comodidad del paciente y la región blanco.

La delineación de los volúmenes blanco de irradiación y el diseño de campos resultan de la combinación de maniobras semiológicas, tomografía computada (TC) y resonancia magnética nuclear (RMN).

Cuando el tumor ha sido resecado quirúrgicamente no existe volumen tumoral evidente (*gross tumor volumen*, GTV). El volumen blanco clínico (*clinical target volumen*, CTV) incluye la cicatriz completa, el lecho operatorio y un margen de 5-8 cm. El volumen blanco de planificación (*planning target volumen*, PTV) incluye al CTV con un margen que contemple las inexactitudes de posicionamiento, entre 0,5 y 1 cm.

Como se mencionó antes debe excluirse una franja de tejido sano de al menos 1 cm, en lo posible opuesto a la cicatriz, para evitar un bloqueo del drenaje de linfa desde las regiones distales a la tratada.

Se pueden combinar distintas energías de fotones y electrones para lograr distribuciones de dosis óptimas. Es frecuente el uso de ‘bolus’ para evitar dosis subóptimas en la superficie.

La siguiente tabla resume las dosis de tolerancia de los tejidos u órganos de riesgo y las probables consecuencias al ser excedidas.

Tejido u órgano de riesgo	Dosis de tolerancia	Efecto adverso
Médula ósea roja	2,5 Gy (todo el segmento)	Aplasia, citopenia
Hueso compacto	60 Gy (todo el segmento)	Necrosis, fractura
Grandes arterias y venas	80 Gy	Esclerosis
Nervios periféricos	60 Gy	Neuritis
Músculo	60 Gy	Fibrosis
Cartílago	60 Gy	Necrosis, fractura, esclerosis

20. GARANTÍA DE CALIDAD

Introducción

La radioterapia es un proceso que utiliza radiaciones ionizantes de alta energía como elemento terapéutico. Su objetivo fundamental es el control local y regional de patologías oncológicas. Su aplicación puede producir daños temporales, incapacidades permanentes o muerte. Utiliza recursos tecnológicos complejos y su práctica está sujeta a regulaciones internacionales con carácter de ley. El agente terapéutico no se puede envasar, registrar o autorizar como un fármaco.

La radioterapia está presente en aproximadamente la mitad de los tratamientos oncológicos y cada vez más se la incorpora en prácticas no oncológicas. Es una especialidad muy dinámica en la que es difícil aplicar los sistemas convencionales de ensayos terapéuticos asistenciales. Utiliza máquinas que dispensan radiación de manera que puedan utilizarse fácilmente sobre el paciente. La radioterapia se vale de sofisticados equipos de diagnóstico por imagen que actúan directamente en el proceso terapéutico y sistemas muy complejos de procesamiento e integración de datos.

El equipo de trabajo de una unidad de radioterapia oncológica consta ineludiblemente de personal multidisciplinario, incluyendo al oncólogo especialista en radiaciones terapéuticas (radioncólogo u oncólogo radioterápico), físico médico, enfermero oncológico y tecnólogo especializado (técnico radioterapeuta).

El médico radioncólogo es un profesional experto en oncología clínica y en el empleo terapéutico de las radiaciones ionizantes. Es la autoridad máxima del servicio y responsable de la coordinación del personal y de la ejecución de los procesos terapéuticos. Precisa de un entrenamiento en seguridad radiológica y es el único responsable de la prescripción del tratamiento y de la aceptación del plan de irradiación; asimismo de la ejecución del mismo y del relevamiento de sus efectos adversos.

El físico médico es un experto calificado en física de radiaciones que posee un conocimiento adicional importante en terapia radiante. Es la persona clave en un programa de garantía de calidad e indelegable su participación en la selección, pruebas de aceptación y comisionado de equipos. Lo mismo en el desarrollo de procedimientos, supervisión de planes de irradiación, dosimetría clínica, prevención de accidentes y seguridad radiológica. Las funciones del físico médico son asegurar que la prescripción clínica pueda ser ejecutada y que se corresponda con la planificada, asesorar cómo es la mejor forma de lograr los objetivos terapéuticos (prescripción) y tiene la responsabilidad de los cálculos y la contabilidad de la dosis.

El tecnólogo radioterapeuta debe ser personal con formación universitaria, debe tener formación sanitaria, formación en terapia con radiaciones y en seguridad radiológica, ejecutar los tratamientos, idear inmovilizaciones, moldes, bolus y otros. Su trabajo consiste en realizar la adquisición de datos anatómicos mediante procedimientos radiológicos. Debe asistir al físico y al oncólogo en la simulación real o virtual de los tratamientos y en la dosimetría de estos. Debe comprender y aceptar la capacitación para la ejecución del plan de irradiación que se pretende y es el primer responsable de la ejecución del tratamiento y de vigilar las modificaciones que se producen en el plan como consecuencia de propio tratamiento. Por último, debe tener acabada destreza en la

utilización del equipamiento a su cargo y profundo compromiso con los procesos donde esté involucrado.

La garantía de calidad en radioterapia abarca todos los procedimientos que garanticen la coherencia de la prescripción médica y la seguridad del cumplimiento de la prescripción en lo que respecta a la dosis en el volumen blanco, junto con la dosis mínima al tejido normal, mínima exposición al personal y una adecuada monitorización de pacientes destinadas a conseguir el resultado final del tratamiento. El control de calidad consiste en el proceso regulador a través del cual el nivel de calidad actual es medido, comparado con los estándares existentes y finalmente, las acciones necesarias para mantener o recuperar la conformidad con los mismos.

El programa de garantía de calidad forma parte del plan de mejora continua en el camino hacia la excelencia. Está destinado a reducir las posibles causas de error con el diseño de sistemas centinela y barreras físicas y operativas, prevenir violaciones de los requerimientos regulatorios (organismos reguladores, sanidad, protección de datos) y asegurar la conformidad con los estándares recomendados (ESTRO, ASTRO, AAPM, IAEA).

Aspectos a Considerar en un Programa de Garantía de Calidad

- Los que afectan a la legislación
 - Legislación sobre el uso médico de las radiaciones ionizantes
 - Legislación en control de calidad para asegurar la protección radiológica del paciente
 - Legislación en materia de seguridad radiológica
 - Ley de puesta en servicio de materiales y equipos
- Los que afectan a los equipos
 - Control de calidad de la instrumentación metrológica
 - Determinación y control periódico del estado de referencia de la máquina
 - Determinación y control de calidad de equipos de braquiterapia
 - Control de calidad de los sistemas de imágenes
 - Control de las técnicas de fusión (registro) de imágenes
 - Modelado y control de calidad de planificadores
 - Control de calidad de las redes y sistemas de transferencia de datos
 - Control de calidad del mantenimiento de los equipos
- Los que afectan a los procesos terapéuticos
 - Toma de datos
 - Diseño de haces y técnicas aplicables
 - Optimización de distribuciones de dosis
 - Cálculo de dosis
 - Verificación física del tratamiento
 - Puesta en tratamiento
 - Verificación de cada fracción y del global realizado

- Los que afectan a los protocolos médicos
 - Estadificación de la enfermedad
 - Decisión terapéutica
 - Toma de datos
 - Prescripción del plan de irradiación
 - Aceptación de la dosimetría
 - Puesta en tratamiento
 - Verificación de cada fracción y del global realizado
 - Seguimiento y control de toxicidades

Fases del Programa de Garantía de Calidad

- Preparación

Conjunto de actividades destinadas a concienciar al personal de la necesidad y conveniencia de un plan de calidad e informar de las características del mismo

- Desarrollo

Consiste en definir la política de calidad, preparar los procedimientos y preparar las instrucciones de trabajo

- Implementación

Incluye programas de capacitación y validación

- Consolidación

Supone un cronograma de auditorías internas y revisión periódica del sistema para su perfeccionamiento continuo

A modo de conclusión podemos decir que debemos construir un sistema de calidad que sea sensible, práctico, económico y reactivo. Debemos convencer al nivel gerencial de la necesidad de un sistema de calidad, de respetar el plan inicial y los tiempos del mismo. Debemos estimular al personal para que se involucre en los procesos de garantía de calidad y al nivel gerencial para que escuche sus comentarios para hacerlos parte de su desarrollo.

La calidad tiene un costo por el aumento de personal, la adquisición de tecnología específica para su gestión, el diseño y evaluación de sistemas de seguridad y la disminución del tiempo de operación de las máquinas.

La mala calidad también tiene un costo por la pérdida de la motivación personal y competitividad, aumento de los fracasos terapéuticos y mayor riesgo de demandas y sanciones. En definitiva, por la devastadora pérdida general de la eficiencia.

21. DOSIMETRÍA 'IN VIVO'

A modo de esquema, las distintas etapas del proceso radioterápico son:

Estado de Referencia

- Calibración de equipos de irradiación
- Calibración de equipos de metrología de radiaciones
- Comisionamiento del planificador
- Calibración de sistemas de imágenes
- Sistema de transferencia
- Sistema de registro y verificación

Preparación del Plan de Irradiación

- Adquisición de imágenes tomográficas
- Fusión de imágenes
- Delineación de contornos de los volúmenes de interés
- Prescripción de la dosis al volumen blanco de planificación (PTV)
- Prescripción de restricciones de dosis a los órganos de riesgo

Dosimetría y Cálculo de Dosis

- Definición de haces
- Conformación de contornos
- Obtención de mapas de isodosis
- Obtención de histogramas dosis/volumen
- Aceptación y optimización del plan
- Cálculo de unidades monitor
- Determinación de referencias geométricas de los haces
- Transferencia de datos al acelerador lineal

Preparación (*set up*) y Ejecución del Tratamiento

- Colocación del paciente
- Situación de coordenadas de isocentro
- Corroboración de ángulos de gantry (incidencias)
- Corroboración de la forma de los campos
- Obtención de imagen portal
- Comparación con radiografía reconstruida digitalmente (DRR) de planificación
- Verificación de datos del plan de irradiación
- Irradiación (administración del tratamiento al paciente)

Existen diversos tipos de errores en radioterapia: por daño o mal funcionamiento de los equipos, en la generación de haces de radiación (dosimetría física), en la adquisición de contornos y densidades, en el diseño del plan de irradiación, en el cálculo de la dosis (dosimetría clínica), en la prescripción o transferencia de datos al irradiador y errores por mala posición del paciente con relación al haz de irradiación planificado.

Se denomina dosimetría 'in vivo' a la determinación de la dosis administrada en el interior de un paciente mediante la información proporcionada por detectores fiduciaros externos al volumen blanco.

Los dosímetros pueden localizarse de manera:

- Intracavitaria: detectores ubicados en cavidades anatómicas normales próximas al volumen blanco
- Superficial: detectores dispuestos en la superficie de la piel
- Externa: procesando la información proporcionada por el haz una vez que ha atravesado al paciente

El objetivo general de la dosimetría 'in vivo' es verificar que las dosis planificadas son las recibidas por el paciente dentro de los márgenes de tolerancia determinados para cada procedimiento. La dosimetría intracavitaria tiene por objeto medir la dosis en cavidades del cuerpo que son órganos sensibles. La aplicación más conocida es la dosimetría intrarrectal en el tratamiento ginecológico con braquiterapia.

Las cámaras de ionización por su parte, permiten medir directamente la dosis absorbida, tienen el tallo flexible para facilitar la introducción en las cavidades y deben ser utilizadas con una fuente de comprobación que asegure la estabilidad del certificado de calibración.

Los dosímetros termoluminiscentes se componen de cristales con impurezas características que absorben y almacenan la energía de la radiación, la cual es devuelta en forma de luz visible cuando el cristal se calienta.

La dosimetría MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) no tiene dependencia con la tasa, tiene repuesta isótropa, no depende ni de la temperatura ni de la energía, el detector es de pequeño volumen.

La dosimetría portal tiene por objeto estimar o determinar la distribución de dosis absorbida en el paciente en cada sesión y compararla con la proporcionada por el planificador. Utiliza cámaras de ionización por transmisión, y reconstruye la distribución de dosis con la nueva fluencia de acuerdo a las características de la planificación. El *compass* dispone de 1600 cámaras de ionización plano-paralelas de 0,02 cm³. Tiene un área activa de 40 x 40 cm² proyectados en el isocentro y una sensibilidad de 8 nC cuando se suministran 1 Gy en el isocentro a 5 cm de profundidad para un campo de 10 x 10 cm² con una uniformidad mayor al 1%.

Los dispositivos electrónicos de imágenes portales (*electronic portal imaging devices*, EPID) son usualmente utilizados para verificación de las puestas en tratamiento y movimiento de órganos. Los patrones de imagen de transmisión pueden ser utilizados para estimar por retroproyección la distribución de dosis en un plano a la altura de la fuente que deseamos dentro del paciente, generalmente en el isocentro. Un programa de dosimetría 'in vivo' requiere el trabajo conjunto de físicos médicos, dosimetristas, tecnólogos y médicos radioncólogos.

22. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Introducción

Los riesgos de la radiación sólo se pueden restringir, no eliminar. Se deben establecer normas de protección para todas aquellas actividades que impliquen la exposición a la radiación, ya sea trabajadores, pacientes o público en general. Por otro lado, los beneficios de la radiación son el diagnóstico y el tratamiento de patologías médicas.

Efectos de las Radiaciones

Los efectos de las radiaciones para la salud humana pueden ser:

- **Determinísticos**

Ocurren a partir de una dosis umbral. Se manifiestan dentro de un período corto después de la irradiación. A mayor dosis mayor severidad. Algunos ejemplos que se ven en la práctica diaria en un departamento de radioterapia son las náuseas, eritema cutáneo, cataratas, cistitis, diarrea

- **Estadísticos o estocásticos**

No dependen de una dosis umbral para manifestarse, basta una sola mutación en el ADN de la célula para que exista la probabilidad de ocurrencia. A mayor dosis, mayor probabilidad de ocurrencia. La severidad es independiente de la dosis y los efectos tardíos son neoplasias o eventos hereditarios

Exposición a las Radiaciones

La exposición a la radiación se divide en tres categorías:

- **Ocupacional**

Todas las exposiciones que reciben los trabajadores durante su labor con radiaciones ionizantes

- **Médica**

Pacientes sometidos a diagnóstico o tratamiento con radiaciones ionizantes. No se aplica límite de dosis. Se aplican los criterios de justificación, optimización y niveles de referencia diagnóstica

- **Público**

Comprende todas las personas que no están incluidas en los otros dos tipos de exposiciones

Dosis Equivalente y Dosis Efectiva

Para correlacionar la dosis con los efectos biológicos se debe ponderar la acción de diferentes radiaciones ionizantes sobre distintos órganos. La dosis equivalente tiene en cuenta la efectividad de la radiación para provocar efectos determinados en el organismo. Su unidad de magnitud es el Sievert (Sv).

La exposición de un determinado órgano, o de manos y pies se expresa en términos de dosis equivalente (H_T). Su magnitud se ve afectada por un factor de ponderación dependiente del tipo de radiación ionizante (w_R).

$$H_T = D \times w_R$$

Para evaluar el efecto total se deben sumar las dosis equivalentes en los distintos órganos ponderados por un factor w_T que representa la radiosensibilidad relativa de cada órgano.

$$E = \sum H_T \times w_T$$

La dosis efectiva (E) refleja la probabilidad del daño resultante por la absorción de dosis de radiación. Su unidad también es el Sievert (Sv); la subunidad más empleada es el milliSievert (mSv).

Se pueden comparar dosis efectivas provenientes de distintos tipos de radiación y diferentes modos de exposición a la radiación. Los límites anuales de dosis para trabajadores y público se expresan en términos de dosis efectiva anual.

Principios fundamentales de la protección radiológica

Las prácticas que utilizan radiación ionizante sólo deben adoptarse si producen un beneficio mayor al detrimento que causan (riesgo de cáncer radioinducido). Las dosis individuales debidas a la combinación de exposiciones no deben exceder los límites ocupacionales y de público, con la excepción de las exposiciones médicas.

La magnitud de las dosis individuales, la cantidad de personas expuestas y la probabilidad de las exposiciones deberían mantenerse 'tan bajas como sea razonablemente posible' (*as low as reasonably achievable*, ALARA) teniendo en cuenta los factores económicos y sociales, restringiendo las dosis dispensadas y los riesgos asociados.

En terapia radiante la justificación de la irradiación de cada paciente corresponde al médico radioterapeuta, quien evalúa la relación riesgo/beneficio. La dosis a los tejidos normales debe ser lo más baja posible (ALARA) pero consistente con la entrega de la dosis prescrita al volumen blanco de planificación (PTV).

La optimización implica disminuir la exposición del paciente al valor mínimo necesario para lograr los objetivos diagnósticos. Para el caso de una mujer embarazada el embrión o feto debe ser protegido como un miembro del público, de lo contrario existe el riesgo probabilístico de inducir neoplasias (leucemia) o malformaciones congénitas (para dosis varias veces superiores al umbral). En el caso de una trabajadora embarazada, el empleador debe asegurar que el feto no reciba más de 1 mSv desde el momento en que es declarado el embarazo (equivalente a 2 mSv en la superficie del abdomen) y que la madre no se exponga a contaminación radiactiva significativa durante el período de lactancia (1/20 del límite anual).

Principios Básicos para el Empleo Seguro de la Radiación Ionizante

- Disposiciones generales sobre seguridad
- Disposiciones locales particulares
- Sistemas de vigilancia
- Adiestramiento
- Instrumentos
- Sistemas de advertencia
- Señalización
- Normas prácticas de seguridad radiológica

Instalación de Máquinas para Radioterapia

- Previo a la construcción se hace un cálculo de blindaje
- Etapa de construcción
- Etapa de puesta en marcha

Sistemas de Seguridad y Monitoreo

Se hacen mediciones relacionadas con la vigilancia y el control de la exposición a la radiación y al material radiactivo. Estas ayudan a demostrar una adecuada optimización de la protección y permiten comprobar experimentalmente y con la periodicidad necesaria, que tanto las dosis recibidas como los niveles de riesgo existentes están dentro de los límites correspondientes a cada zona.

- Tipos de monitoreo
 - Monitoreo de áreas: mediciones hechas en las zonas de trabajo. Puede ser superficial y ambiental (contadores Geiger-Müller y cámaras de ionización)
 - Monitoreo individual: Se realiza a cada trabajador e incluye la interpretación de estas mediciones (dosímetros de película, dosímetros termoluminiscentes, dosímetros de cámara de bolsillo)

Los dosímetros personales son intransferibles, se almacenan lejos de fuentes de radiación, no deben sacarse de la institución de trabajo y debe haber uno por cada lugar de trabajo donde se opere con radiaciones.

En cuanto a la prevención de accidentes mencionamos a continuación los riesgos asociados a las unidades de tratamiento:

- Riesgos asociados a unidades de ^{60}Co

Residuos de fuente, radiación de fuga, fallo del temporizador (*'timer'* similar a equipos de rayos X de energías medias y bajas), atascamiento de la fuente

- Riesgos asociados a aceleradores lineales

Falla en los monitores de dosis, uniformidad del haz incorrecta, modalidad incorrecta (fotones o electrones), energía incorrecta, radiación de fuga, producción de neutrones (error en el diseño del laberinto y activación residual)

23. ALTAS TECNOLOGÍAS: RADIOTERAPIA ROBOTICA

Ventajas y Funcionamiento del Sistema de Radioterapia Robótica

La meta del tratamiento es la irradiación de un volumen tumoral definido con el menor daño posible al tejido sano circundante, lo que resulta en la erradicación del tumor, una mejor calidad de vida y en muchos casos la prolongación de la supervivencia total o libre de enfermedad.

La radioterapia robótica es el único sistema que realiza el 100% de los tratamientos no isocéntricos y no coplanares. Ofrece el ajuste automático y corrección de los errores de posicionamiento del paciente durante el tratamiento con una gran precisión clínica, irradiación continua de órganos en movimiento y radiocirugía estereotáxica sin marco. Además, es posible administrar una dosis única o hipofraccionamiento aún con órganos de riesgo próximos al volumen diana. Tiene un índice de conformación (*conformal index*, CI) notablemente superior a la radioterapia de intensidad modulada (IMRT) y el posicionamiento del paciente es absolutamente automático.

Brinda una visión exacta, no ofrecida por ninguna otra modalidad de radioterapia ni equipo de radiocirugía. Es el primer sistema de radiocirugía que sigue los movimientos del cuerpo, dando una ubicación exacta del tumor en tiempo real con una precisión submilimétrica. Mantiene esta precisión en tumores que se mueven con la respiración, como los tumores de pulmón. La gran precisión permite suministrar altas dosis de radiación al volumen blanco, mientras que protege el tejido sano que rodea la zona de tratamiento.

El sistema administra la radiación con precisión quirúrgica, sin necesidad de cirugía abierta, por lo que no requiere de anestesia y no presenta los riesgos de una cirugía. Después del tratamiento, el paciente puede regresar a su casa y reanudar sus actividades diarias sin tener que pasar por un periodo de recuperación.

Proceso de Tratamiento

- Colocación de semillas de marcado si es necesario
- Obtención de imágenes del área de interés
- Planificación del tratamiento
- Generación de radiografías reconstruidas digitalmente (DRRs)
- Simulación del movimiento del volumen diana
- Comparación de imágenes adquiridas en el equipo con DRRs en forma previa a cada fracción y/o incidencia de tratamiento
- Corrección de mesa/posición del robot según la desviación calculada
- Verificación radiográfica del posicionamiento del paciente
- El sistema de imagen ‘aprende’ el movimiento del tumor que queremos tratar
- Una vez confirmado el seguimiento se inicia el tratamiento

- La verificación de los parámetros se realiza durante el tratamiento y se corrige en tiempo real

Algunas de las indicaciones para el empleo de esta tecnología son la presencia de lesiones intracraneanas (metástasis, malformación arteriovenosa, neuralgia del trigémino), mama, columna, riñón y lesiones retroperitoneales, pulmón, hígado y páncreas, próstata, útero y recidivas pélvicas.

Radiocirugía es como se denomina el procedimiento médico de radioterapia en que se administran haces finos de radiación generados en unidades de megavoltaje mediante múltiples campos convergentes y conformados con lo cual se consigue dispensar dosis elevadas y localizadas con precisión, en una área o estructura anatómica específica, evitando la administración de dosis tóxicas a los tejidos adyacentes. Para la localización espacial y precisa de las estructuras anatómicas que se quiere irradiar se usa la estereotaxia, por lo cual también se la denomina 'radioterapia estereotáxica'.

El principio fundamental de la radiocirugía es el de la ionización selectiva de los tejidos por medio de rayos de alta energía de radiación. La ionización es la producción de iones y radicales libres que suelen ser nocivos para las células. Estos iones y radicales, que pueden formarse a partir del agua o de los materiales biológicos, pueden producir daños irreparables en el ADN, proteínas y lípidos lo que resulta en la muerte de la célula. Así, la inactivación biológica se lleva a cabo en un volumen de tejido a tratar con un efecto destructivo preciso. La dosis de radiación se mide generalmente en Grays, donde 1 Gray (Gy) representa la absorción de 1 Joule por kilogramo de masa. Una unidad que intenta tomar en cuenta tanto los diferentes órganos que se irradian y el tipo de radiación es el Sievert (Sv), una unidad que describe tanto la cantidad de energía depositada como la eficacia biológica.

Indicaciones

- Radioterapia intracraneana
 - Lesiones benignas: malformaciones arteriovenosas, neuralgia del trigémino, neurinoma del nervio acústico
 - Lesiones malignas: metástasis, neoplasias primarias
- Radioterapia corporal extracraneana
 - Columna: tumores primarios y metástasis cervicales, dorsales y lumbares
 - Cabeza y cuello: laringe, nasofaringe, lengua, tumores oculares, ganglios
Mama: tratamientos hipofraccionados tras cirugía conservadora, irradiación parcial acelerada, *boost*
 - Tórax: cáncer de pulmón, metástasis
 - Intrabdominal: hígado, páncreas, riñón, metástasis, retroperitoneo
 - Pelvis: próstata, cuello uterino, recidivas pélvicas, metástasis

24. OPTIMIZACIÓN DE LA SEGURIDAD Y PREVENCIÓN DE INCIDENTES GRAVES EN RADIOTERAPIA

El 50% de los pacientes portadores de cáncer tendrán indicación de recibir tratamiento radiante en algún momento del curso de la enfermedad. Cada vez se disponen de tecnologías más sofisticadas para la administración de radioterapia. La seguridad de los tratamientos es una prioridad de cada institución y un interés de la seguridad en salud pública.

Los incidentes ligados a la radioterapia son relativamente frecuentes y potencialmente graves. Son de declaración obligatoria médico-legal y es necesaria su transparencia y judicialización.

A modo de resumen, los objetivos de optimización de la seguridad y prevención de incidentes graves en radioterapia son:

- Implementar la gestión de ‘Calidad-Seguridad’ en el departamento de radioterapia (sección de física estrechamente involucrada)
 - Perpetuar un retorno de experiencia
 - Basada sobre la observación, reporte y análisis de los eventos precursores de accidentes por los mismos actores (factor humano)
- Evaluar las medidas de prevención sobre uno o diferentes segmentos en la atención de los pacientes
- Documentar y difundir los procedimientos

Las opciones de optimización y mejora se ilustran en el siguiente ejemplo:

- Instalación de un sistema de seguridad y prevención de incidentes en abril 2007
 - Registro sistemático de cuasi accidentes o accidentes
 - Recolección regular por un marco referente de todas las declaraciones
 - Elegir y estudiar mensualmente un evento por un grupo de análisis
 - Proposición de medidas correctivas para realizar obras concretas
- Instalación de la documentación de procedimientos a partir de junio 2007
 - Redacción, colecta y puesta al día de los procedimientos prioritarios juntando las interfases y la seguridad en el conjunto del departamento de radioterapia

Este grupo de decisión tiene una reunión mensual de alrededor de 1 hora donde el orden del día es:

- Presentación de todos los eventos recopilados del mes
- Decisión de elegir el evento a analizar
- Elección del experto que será ‘piloto’ del análisis
- Validación del análisis del evento estudiado el mes anterior
- Decisión de acciones correctivas y puesta en acción
- Verificación del funcionamiento de las acciones correctivas tomadas anteriormente
- Decisión sobre las acciones de comunicación eventualmente adaptadas

Los resultados fueron los siguientes:

- Gestión general
 - 266 eventos precursores declarados en 2007
 - 7 acciones voluntarias de superación concreta
 - Registro de casos para facilitar el seguimiento y la retroinformación a los profesionales
- Gestión de procedimientos
 - 60 temas elegidos, 30 redactados
 - 50% de los procedimientos anteriormente registrados

Las conclusiones y perspectivas las resumimos a continuación:

- Completar y poner al día la documentación
- Estimular el seguimiento de las declaraciones
- Comunicaciones internas continuas, en particular sobre las acciones correctivas
- Informatizar las declaraciones
- Intercambio entre los otros dos centros pilotos

25. ALTA TECNOLOGÍA

Las radiaciones ionizantes actúan a nivel atómico molecular y producen diferentes efectos sobre los seres vivos. En algunas instancias inhiben la proliferación celular, en otras la estimulan y en general suprimen parcial o totalmente las funciones tisulares u orgánicas.

Ganancia Terapéutica de la Alta Tecnología

- Mayor control de la posición

Cuando la tecnología nos brinda una mejor ubicación topográfica de los volúmenes que se desean tratar y de aquellos que se pretenden proteger, los resultados en distribución dosimétrica tienden a ser óptimos

- Mayor capacidad de modulación

La alta tecnología permite una mejor conformación del haz de radiación, mayor precisión, mayor exactitud y en consecuencia, mejor distribución de la dosis dispensada

- Mayor capacidad de planificación

Los sistemas de planificación modernos brindan capacidades tales como integración de imágenes provenientes de distintos recursos, mejor discriminación visual de estructuras, reconstrucciones tridimensionales, interfases 'amigables' para el equipo profesional, algoritmos de cálculo novedosos y sistemas de registro y relevamiento terapéutico que disminuyen las probabilidades de errores. Todo con un objetivo en común, que la dosis absorbida y las restricciones dosimétricas sean las prescritas

Aspectos Clínicos de la Adopción de Nuevas Tecnologías

Las nuevas herramientas de planificación con alta tecnología permiten escalar dosis, es decir, aumentar la dosis administrada sobre el volumen diana. Una mayor dosis sobre el tejido neoplásico blanco implica reducir la probabilidad de supervivencia celular lo que potencialmente puede aumentar el control local y regional de la enfermedad.

La mayor parte de los tratamientos fraccionados insumen lapsos lo suficientemente prolongados como para que durante su curso se puedan identificar cambios volumétricos en los tumores (respuesta) y cambios anatómicos en los pacientes (variaciones ponderales, postura, distensión abdominal). La radioterapia adaptativa consiste en modificar el plan terapéutico acorde se manifiestan progresivamente dichas alteraciones. Las tecnologías nuevas permiten estos cambios estratégicos sin necesidad de interrumpir un curso terapéutico por períodos contraproducentes desde el punto de vista biológico.

Otro desafío que enfrenta la planificación del tratamiento es tener en cuenta que existen estructuras con altos niveles de heterogeneidad tisular intrínseca (fluidos, grasa, hueso, aire, músculo). Ello da lugar a distribuciones muy variadas de la dosis absorbida 'real' dentro de un mismo volumen.

La incorporación y puesta en marcha de programas de alta tecnología en los servicios de oncología radioterápica debe tener, de acuerdo a lo expuesto, una evolución paulatina, coherente, prudente y acorde a la formación del grupo profesional. Es primordial tener en cuenta el factor socioeconómico zonal y las capacidades formativas locales cuando se estudia la factibilidad de montar un servicio provisto de alta tecnología.

El incremento significativo del costo operativo general inherente a la incorporación de alta tecnología representa la principal limitación para implementar proyectos de este tipo. Debe considerarse:

- Personal calificado existente e incorporación de nuevos profesionales
- Programas estrictos de mantenimiento tecnológico
- Adquisición de equipos 'suficientes' para tener sostén asistencial en caso de desperfectos de uno de ellos
- Rápida respuesta en intervenciones reparativas y provisión de repuestos
- Capacidad de adquirir actualizaciones informáticas periódicas
- Mayor tasa de ocupación de máquina por paciente
- Inversión en sistemas de seguridad y control
- Mayor consumo temporal del personal en simulación, planificación, verificación y ejecución de los tratamientos
- Sistemas de salud (el Estado, obras sociales, seguros de salud, sistemas prepagos) capaces de afrontar los gastos que implica un programa de estas características
- La tecnología no se estabiliza por periodos compatibles con la explotación de la misma. Es decir, los avances tecnológicos son tan rápidos que en algunas ocasiones no da tiempo a rentabilizarlos, algo similar a lo que ocurre en la industria de los dispositivos de telefonía móvil o sistemas informáticos

Terapia Rotacional

Las nuevas tecnologías para la administración de radioterapia rotacional poseen en la mayoría de los casos algunas similitudes, independientemente de la casa que los comercializa y que mencionamos a continuación:

- Incorporación de la imagen tomográfica a la unidad de tratamiento para la verificación del procedimiento
- Tratamientos dispensados con el gantry en movimiento. Permite una mejor distribución de la dosis
- Sistemas de modulación de intensidad con haces pequeños. Permiten una mayor conformación de la radiación siendo especialmente útil en volúmenes con morfología compleja, volúmenes cercanos a estructuras críticas sanas (ej. médula) y reirradiaciones

Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT)

Consiste en la modificación de la distribución espacial de la intensidad de un haz de radiación para la obtención de distribuciones de dosis con incremento de homogeneidad adaptadas a los volúmenes de interés.

La IMRT brinda mayor conformación, mayor homogeneidad y menor dosis integral. Esto permite:

- Escalar dosis
- Tratar más adecuadamente estructuras o volúmenes cóncavos
- Un mayor control del tratamiento
- Diseñar tratamientos con radioterapia mediante planificación inversa
- Una mejor localización de las estructuras mediante la integración de sistemas de imagen
- Disponer de sistemas de verificación confiables, como por ejemplo poder aplicar radiación guiada por imagen (IGRT)

Tipos de IMRT

- IMRT de campos fijos:
 - Modulación con compensadores
 - Modulación segmentada
 - Modulación de abertura dinámica
- IMRT rotacional:
 - Modulación mediante arcos dinámicos (IMAT)
 - Tomomodulación en serie
 - Tomomodulación helicoidal

Radioterapia Robótica

El sistema de radiocirugía robotizada es una alternativa no invasiva a la cirugía para el tratamiento de neoplasias localizados en cualquier parte del cuerpo, pero especialmente en cerebro, pulmones, hígado, vértebras cercanas a la médula espinal, próstata y metástasis.

La radioterapia robótica es el primer y único sistema de cirugía robotizada diseñado para tratar tumores de forma no invasiva. Ofrece una opción indolora y no quirúrgica para pacientes con tumores complejos.

El sistema corrige los cambios de posición automáticamente con una precisión mecánica submilimétrica, utiliza entre 150 y 200 haces por fracción, con la opción de incidencias isocéntricas o no, coplanares o no.

26. MODELOS DE ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO, CALIDAD, ESQUEMA Y PRODUCTIVIDAD, INNOVACIONES TECNOLÓGICAS Y SEGURIDAD TERAPÉUTICA

Para el control de calidad y seguridad hay que hacer calibraciones de las unidades y de los haces de radiación, tener una protección radiológica adecuada, redes informatizadas de conexión entre planificadores y unidades de tratamiento, sistemas de visión portal, cumplimiento de la legislación nacional, normas de acreditación e implementación de una cultura de seguridad y nuevos modelos de organización en la seguridad de los tratamientos.

Los conceptos de seguridad aérea y aviación civil son exportables para todo grupo de individuos o sistemas que se interaccionan colectivamente para obtener un mismo objetivo. Se deben entender los errores y aceptarlos como parte integrante de nuestros modelos de trabajo e identificarlos en su estado precursor, ya que declarar y analizar el error positivamente construye mejores servicios. En cambio, negar las anomalías y sólo determinar culpas y responsabilidades, atrasan los servicios.

Un servicio de oncología radioterápica debe ofrecer una medicina basada en la eficacia, eficiencia, efectividad, equidad y calidad. En una situación de constricción económica se requiere de una optimización máxima de los recursos. Tanto el personal como las unidades de tratamiento deben adecuarse a la realidad social.

Cada centro debe efectuar una gestión optimizada basada en el estudio de índices que mostrarán cómo se han gestionado las unidades, normativas que indiquen la calidad asistencial ofrecida y elaboración de guías clínicas basadas en la evidencia.

Se requiere de una situación de compromiso entre los gestores y los especialistas con el fin de obtener una medicina que considera al paciente como centro, basada en los criterios anteriormente expuestos.

27. CARACTERIZACIÓN DE UN *BOLUS* ELABORADO EN UNA UNIDAD DE RADIOTERAPIA

La irradiación con fotones de alta energía produce una dosis absorbida máxima por debajo de la superficie. Esto hace que la dosis superficial sea sólo una fracción de la dosis máxima. Si se trata de un paciente podemos decir que la piel queda subdosada. En los casos que se desee evitar esta situación se deberán colocar ‘bolus’ de forma que el máximo se desplace hacia la piel.

Los materiales equivalentes a tejido usados en radioterapia para reducir la profundidad de la dosis máxima se denominan ‘bolus’. Estos materiales deben ser flexibles para que se adapten a las curvaturas de los pacientes sobre la superficie de la piel.

Los tratamientos más comunes en los que suele requerirse el uso de ‘bolus’ son los destinados a neoplasias ubicadas en mama, piel y partes blandas, cabeza y cuello.

Los principales motivos que nos llevan a la elaboración de ‘bolus’ personalizados incluyen la necesidad de utilizar estos en algunos tratamientos, la incertidumbre en la utilización de gasas húmedas, no contar con un departamento de prótesis y los altos costos de los ‘bolus’ comerciales.

Para la elaboración del ‘bolus’ se emplea la siguiente metodología:

1. Pesarse la cantidad de grenetina necesaria
2. Hidratar la grenetina, agregando agua y mover constantemente para evitar la formación de grumos
3. Cuando se disuelva perfectamente la grenetina incorporar la cantidad necesaria de glicerina y revolver hasta formar una mezcla uniforme
4. Nivelar la base con nivel de burbuja y colocar sobre ella el recipiente graduado
5. Vaciar la mezcla en el recipiente graduado hasta alcanzar el grosor deseado del ‘bolus’ y esperar a que cuaje
6. Retirar el ‘bolus’ del recipiente y envolverlo en plástico

Para la caracterización se hizo la comparación entre un ‘bolus’ comercial y el de grenetina hecho en la unidad de radioterapia para evaluar la eficacia de este realizando cortes tomográficos de 3 mm a cada uno de ellos revisando sus valores en unidades Hounsfield. Se realizaron medidas de dosis utilizando una cámara de ionización de 0.3 cm³, tamaño de campo de 10 x 10 cm². Se utilizaron fotones de 6 MV y 18 MV para las mediciones y 100 U.M. por medición.

Se obtuvieron las unidades Hounsfield de cada uno de los ‘bolus’ realizando un mapeo en los ejes x, y, z promediando las medidas obtenidas para cada uno de ellos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- 50 HU para el ‘bolus’ comercial
- 60 HU para el ‘bolus’ de grenetina

Los resultados de las medidas tomadas con la cámara de ionización fueron:

Energía de fotones	Dosis medida dispensando 100 U.M.	
	'Bolus' Comercial	'Bolus' de grenetina
6 MV	0.8461 Gy	0.8471 Gy
18 MV	0.9667 Gy	0.9670 Gy

La diferencia porcentual de la dosis medida con energía de 6 MV fue de 0.12%; con 18 MV se encontró una diferencia de 0.03%. Las curvas de isodosis que se obtuvieron para ambos materiales y normalizando a $D_{m\acute{a}x}$ fueron similares.

Finalmente se utilizó el 'bolus' de grenetina en un paciente, colocándolo desde la tomografía de simulación; también se hizo el experimento con resultados equivalentes para los distintos materiales.

A modo de conclusión podemos decir que es posible implementar el 'bolus' de grenetina porque el resultado dosimétrico es igual al del 'bolus' comercial, siendo una excelente alternativa cuando no se cuenta con grandes presupuestos.

28. BRAQUITERAPIA

Introducción

Las terapias conformacionales son la braquiterapia y la teleterapia. Dentro de la teleterapia encontramos varios tipos de tratamientos con acelerador lineal: convencional, conformada dinámica y modulación de intensidad. Las limitaciones de la teleterapia son el fraccionamiento, el movimiento del blanco, y las dosis no intencionales de los órganos de riesgo.

El objetivo de la radioterapia conformada es adaptar la distribución de dosis a la forma del volumen blanco. Los componentes del resultado terapéutico son la dosis absorbida y el efecto terapéutico de la dosis. Para ello se realiza:

- Conformación y modulación: cubrir un volumen de tejido con un campo de radiación de manera que la distribución de dosis absorbida se adapte de forma óptima del objetivo terapéutico
- Optimización: aproximación a los objetivos clínicos ponderando la toxicidad de los tejidos normales
- Obtención del máximo gradiente en los bordes del volumen blanco de planificación (PTV) y mínimo gradiente dentro del PTV para alcanzar una adecuada homogeneidad de la dosis en el volumen tratado

La braquiterapia se define como el tratamiento de lesiones oncológicas por medio de fuentes radiactivas que se colocan en el seno de los tejidos o en estrecho contacto con ellos. Su objetivo es administrar al volumen blanco clínico (CTV) la dosis absorbida admitida como terapéutica

Las características del tratamiento braquiterápico son:

- Emplea fuentes radiactivas encapsuladas para dispensar una alta dosis a los tejidos blanco
- Sistemas de contención y colimación de acuerdo al aplicador
- Alto gradiente de dosis
- Alta conformalidad y heterogeneidad de la dosis en el PTV
- Tiempos ‘breves’ de administración de dosis

Las fuentes más comúnmente usadas son:

Isótopo	Vida media	Presentación
Cesio (^{137}Cs)	30 años	Agujas, tubos, semillas
Iridio (^{192}Ir)	74 días	Hilos, discos, horquillas
Iodo (^{125}I)	59 días	Semillas para implantes permanentes
Paladio (^{103}Pd)	17 días	Semillas para implantes permanentes

De acuerdo a la localización de las fuentes radiactivas en relación al volumen blanco los procedimientos de braquiterapia se clasifican en braquiterapia intersticial, endocavitaria, plesoterapia, endovascular e infusional. Las dos primeras representan las prácticas más comunes en esta disciplina.

- Técnicas de terapia intersticial: hilos plásticos, agujas vectoras, agujas hipodérmicas y horquillas vectoras
- Técnicas de terapia endocavitaria: aplicadores rígidos (Fletcher-Delclos), aplicadores flexibles (Deluche), moldes vaginales (Chassagne), y cilindros vaginales (Delclos)

Sistemas de planificación

La braquiterapia ginecológica representa globalmente la principal indicación de esta práctica. Debido a los marcados gradientes de dosis que existen entorno a las fuentes no es simple calcular y expresar las dosis indicadas en braquiterapia intracavitaria y sus demás aplicaciones.

Existen diversos métodos utilizados por diferentes centros para prescribir y calcular la dosis de un implante de braquiterapia. En ginecología, la mayoría prescriben y calculan la dosis absorbida en el 'punto A' como ha sido descrito en el sistema Manchester. Esta clásica modalidad se encuentra detallada en el *ICRU Report 38* (1985). El requerimiento básico de esta metodología de 'cálculo 2D' es contar con un sistema de adquisición de imágenes radiográficas ortogonales.

Independientemente del sistema de planificación que se use, cada centro debe ser consistente a la hora de calcular y reportar las dosis dispensadas al volumen tumoral y los tejidos circundantes. Es recomendable el uso de histogramas dosis/volumen; asimismo tener en cuenta las equivalencias radiobiológicas para procedimientos de diferentes tasas de dosis.

Recientemente, cambios significativos han tenido lugar en el campo de la braquiterapia debido a la incorporación de técnicas de tratamientos con alta tasa de dosis y el uso de planificación basada en imágenes de mayor complejidad ('reconstrucción 3D').

Un sistema moderno de planificación y cálculo de dosis para braquiterapia remota de alta tasa de dosis debe contar con:

- Dispositivo de ingreso de imágenes de simulación (ejemplo: digitalizador de imágenes)
- Imágenes de reconstrucción 3D de los aplicadores
- Visualización gráfica 2D del implante (axial, sagital, coronal) y opcional 3D
- Cálculo de los tiempos de permanencia de la fuente en cada posición
- Algoritmos de distribución de dosis
- Métodos de optimización
- Representación de histogramas dosis/volumen
- Dispositivos de documentación e impresión del plan y cálculo dosimétrico
- Sistema de transferencia de datos del planificador a la unidad de tratamiento

Potenciales Limitaciones

Algunas exigencias de los programas de garantía de calidad en braquiterapia pueden representar ciertas limitaciones para aquellos centros que no cuentan con suficientes recursos, entre ellas:

- Caracterización física de las fuentes
- Localización espacial de las fuentes
- Algoritmos de cálculo
- Determinación precisa de altos gradientes de dosis
- Incorporación de los errores de set up (situación, posición, inmovilización)
- Incorporación de efectos tisulares y sistemas de evaluación dosimétricos y clínicos del tratamiento
- Suma de distribuciones
- Caracterización y gestión de sistemas de imagen
- Fusión de imágenes
- Normalización de formatos y protocolos de transferencia de imágenes (DICOM) y transferencia de información y control dosimétrico

Protocolo de control de calidad en planificadores

Las diferentes etapas del procedimiento se examinan mediante diversos controles de calidad que mencionamos a continuación:

- El sistema informático
 - Inspección general
 - Verificación del funcionamiento global
 - Funcionamiento del digitalizador y del mouse
 - Funcionamiento del digitalizador automático de placas
 - Funcionamiento del trazador gráfico e impresora gráfica
 - Funcionamiento del monitor
- Adquisición de datos anatómicos
 - Funcionamiento de la base de datos
 - Transferencia de datos de imágenes
 - Conversión de unidades de tomografía a densidad electrónica
 - Herramientas de longitud
 - Cálculo de volúmenes
 - Definición de contornos y segmentación de estructuras
 - Generación y manipulación de estructuras 2D reformateadas y 3D
 - Fusión de imágenes y herramientas de ‘automargen’

- Práctica del procedimiento
 - Introducción de fuentes y puntos
 - Librería de fuentes
 - Especificación de las propiedades de emisión de la fuente y conversión de magnitudes
 - Algoritmos de cálculo
 - Factor geométrico y efecto de los parámetros dependientes de la absorción
 - Verificación de la influencia de la anisotropía
 - Efecto de los aplicadores
 - Suma de contribuciones
 - Algoritmos de optimización de distribuciones
 - Normalización y prescripción de dosis e histogramas dosis/volumen

- Presentación, transferencia de datos y resultados
 - Radiografía reconstruida digitalmente (DRR)
 - Impresión de datos
 - Impresión de curvas y aplicadores
 - Funcionamiento de la red

29. NORMATIVA NACIONAL (REPÚBLICA DE CHILE)

Algunos ejemplos de las normativas y la evolución de los sistemas de regulación llevada a cabo en Chile para radioterapia son:

- El 11 de diciembre de 1967 se promulga el DFL 725 código sanitario
- El ARTICULO 86 'Competencia de los servicios de salud en las instalaciones radiactivas' es reemplazado por la Ley 18.303 /84, DS 133/84 y DS 03/85
- DS 133/84 Ministerio de salud pública: 'Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas u opere tales equipos y otras actividades afines'
- Ley 18.302 de seguridad nuclear. Define dos autoridades competentes
- Ministerio de salud pública (MINSAL)
- Comisión chilena de energía nuclear (CCHEN)
- En 1997 el artículo 101 del Código Sanitario es modificado
- Marco regulatorio para dispositivos médicos. Ley 19.497, DS 828
- Programa control de calidad del ISP (principios de 1990)

El objetivo del programa control de calidad del ISP (PCC-ISP) es evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de los equipos según la norma N° 51 y la implementación de programas de garantía de calidad. El proceso de reforma a la salud chilena se intensifica a partir del año 2000. En el año 2002 se presentan cinco proyectos legislativos al Congreso Nacional que son:

- Derechos y deberes del paciente
- Financiamiento
- Autoridad Sanitaria y Gestión
- Ley de ISAPRES
- Régimen de Garantías en Salud

El 26 de diciembre de 2005 se crea la Macrored Nacional de Radioterapia dependiente de la Subsecretaría de Redes Asistenciales. Su fin es ordenar la oferta de prestadores a nivel de las redes regionales y suprarregionales en base a criterios de incidencia, distribución geográfica, disponibilidad de recursos, capacidad y experiencia de los equipos técnicos.

La Macrored Nacional de Radioterapia es una red refrendada por el Directorio de Macroredes. Se nombra al Instituto Nacional del Cáncer (INC) como coordinador de la Macrored. Esta herramienta de control hace relevamientos periódicos para determinar la demanda y necesidades que enfrenta un establecimiento asistencial y compararla con la oferta potencial del establecimiento, de modo que el proyecto y/o propuesta de solución definitiva permita reducir la brecha observada entre oferta y demanda.

Se definen cinco centros de radioterapia a nivel nacional, tomando en consideración la distribución geográfica de éstos y la experiencia en el área de la radioterapia y que son:

- Hospital Regional de Antofagasta Regiones I – II – III – XV
- Hospital Van Buren Regiones IV – V
- Instituto Nacional del Cáncer Región Metropolitana – VI
- Centro Radioterapia VIII Región Regiones VII – VIII
- Hospital Regional de Valdivia Regiones IX – X – XI – XII – XIV

La ley N° 19.937 (autoridad sanitaria y gestión 2005) asigna al ISP las siguientes funciones:

- Función del Laboratorio Nacional y de Referencia en los campos de imagenología y radioterapia, entre otros
- Fiscalizar el cumplimiento de normas de calidad y acreditación de los laboratorios de imagen y radioterapia