



COLEGIO ODONTOLÓGICO
COLOMBIANO

No. de caso _____

No. de expediente M. 295 1988

Compra ☐ Canje ☐ Donación ☐

Editorial _____

Solicitado por _____

Fecha _____

Precio _____

COLEGIO ODONTOLÓGICO COLOMBIANO

1988



COLEGIO ODONTOLÓGICO COLOMBIANO
BIBLIOTECA SEDE NORTE

~~M
295
1988~~

COLEGIO ODONTOLOGICO COLOMBIANO

MEDICINA NUCLEAR

1988

7.0.
00391-01

7.0.
304
52 8

COLEGIO ODONTOLOGICO COLOMBIANO

FACULTAD DE ODONTOLOGIA

(MEDICINA NUCLEAR)

MARGARITA MARIA RODRIGUEZ TELLEZ

Monografia presentada en cumplimiento parcial
de los requisitos exigidos para optar por el titulo de
Odontóloga.

Bogotá, D.E., Mayo 20 de 1988



COLEGIO ODONTOLOGICO COLOMBIANO
BIBLIOTECA SEDE NORTE

COLEGIO ODONTOLOGICO COLOMBIANO

Dr. JORGE ARANGO TAMAYO
Rector

Dra. MARISOL ARANGO DE LEON
Decana

Dr. JAIRÓ FORERO
Vice-Decano

Dr. FELIPE FALLA
Secretario Académico

Dr. ROBERTO ARCINIEGAS GOMEZ
Coordinador Décimo Semestre

Dr. RAMIRO DIAZ CUJAR
Director Monografía

CONCEPTO DEL DIRECTOR

Con la realización de este trabajo esperamos dar las primeras luces sobre las aplicaciones y futuro de este campo tan importante dentro de la odontología y de la medicina.

Debo felicitar a su autora por su con-
su dedicación, consagración e inteligencia
lo desarrolló y logró los objetivos
impuestos en el concurso; por este
motivo, teniendo en cuenta las dificultades
propias del tema merece en mi concepto
una calificación excelente.



DEDICATORIA

A Dios que ha estado presente en cada instante de mi vida, dándome el poder de pensar, imaginar, planear, determinar,... no solo la elaboración de esta monografía, sino para todas y cada una de las metas que me he propuesto.

A mis padres y hermanos, que me han sabido dar un hogar de paz, serenidad, comprensión y felicidad.

A mis abuelitos, quienes en sus oraciones piden a Dios, me colme de bendiciones.

A Dennis Sierra O., de quien estoy orgullosa por sus valores y virtudes, porque siempre con su generosidad y clara inteligencia, dedica su tiempo y su corazón, en forma firme, erquida y leal a compartir mis sueños y hace de ellos una realidad.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue llevada a cabo gracias a la colaboración del Dr. Ramiro Díaz Cujar, quien con su orientación valiosa lo hizo posible.

Al Dr. Fredy Osorio, quien además de ser un maestro en su oficio, es un amigo, y un verdadero "colega", ya que no guarda nada para sí, sino que comparte con agrado su sabiduría.

A las familias Sierra, Orejuela y Saenz, quienes de una u otra forma han ayudado en la culminación de mi carrera.

INDICE

	Pag.
CARTA DE PRESENTACION	iii
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
BIBLIOGRAFIA	x
I. <u>GENERALIDADES DE LA MEDICINA NUCLEAR</u>	2
II. <u>INTRODUCCION A LA FISICA NUCLEAR</u>	12
2.1. <u>TIPOS DE RADIACION</u>	18
2.1.1. <u>RADIOACTIVIDAD</u>	20
2.1.2. <u>RADIACIONES IONIZANTES</u>	42
2.1.3. <u>INTERACCION DE LA RADIACION CON</u> <u>LA MATERIA</u>	50
2.2. <u>EFFECTOS BIOLOGICOS</u>	58
III. <u>RADIOFARMACIA</u>	61

IV. <u>INSTRUMENTACION</u>	76
4.1. <u>CONTADOR DE POZO</u>	76
4.2. <u>CONTADOR DE CUERPO TOTAL</u>	76
4.3. <u>CENTELLOGRAFO DE DETECTOR MOVIL O LINEAL</u>	77
4.4. <u>CAMARA GAMMA O CAMARA DE CENTELLED</u>	78
V. <u>APLICACIONES CLINICAS</u>	81
5.1. <u>CENTELLOGRAFIA DE TUMORES Y PROCESOS</u> <u>INFLAMATORIOS</u>	81
5.2. <u>EXPLORACION DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL</u> <u>CON RADIOISOTOPOS</u>	85
5.3. <u>APLICACION EN LA TIROIDES</u>	93
5.4. <u>CENTELLOGRAFIA DE LAS GLANDULAS SALIVALES</u>	108
5.5. <u>CENTELLOGRAFIA OSEA</u>	114

INTRODUCCION

La medicina nuclear es la especialidad que se ocupa del diagnóstico tratamiento e investigación médica. Mediante uso de radionuclidos, con exclusión de las fuentes selladas radiantes que se emplean en radioterapia.

Estos radionuclidos son de tipo natural y en su mayoría endógenos, estos emiten radiaciones, las cuales son traducidas por un computador, así haciendo posible lograr una imagen de un órgano o cuerpo extraño que esté en el organismo. La medicina nuclear como veremos, se basa en un 90% en un excelente método para diagnosticar patología de algún órgano y es muy limitada para producir tratamiento.

1. GENERALIDADES DE LA MEDICINA NUCLEAR

ANTECEDENTES Y DESARROLLO

Leucipo de Mileto (Asia Menor) concibió en el año 500 a.de c. la posibilidad de dividir cada cosa en dos partes (dicotomía), cada una de esas dos partes en otras dos, y así sucesivamente, pero la dicotomía no es repetible al infinito.

Tiene un límite más allá del cual resulta imposible, y a ese límite se llega cuando los fragmentos se identifican con el átomo. Atomo significa imposible de dividir, indivisible, y en ese contexto la materia está formada por átomos, cada uno de ellos rodeado de vacío. Átomos y vacío son los dos componentes fundamentales de toda materia. La visionaria concepción de la teoría anatómica de Leucipo, basada puramente en especulaciones metafísicas, constituyó una preciosa sugerencia para quienes, veinte siglos después, habrían de confirmar científicamente en su esencia la teoría del átomo.

Después de los griegos, el primer hito que marcó el comienzo de las investigaciones científicas ocurrió a mediados de

siglo XVII. Robert Boyle, químico y físico, concibió la idea del elemento, sustancia que no puede ser descompuesta en constituyentes más simples; el oro, por mucho que se desmenuce, será siempre oro. Un siglo después, Lavoisier estableció la diferencia entre elementos y compuestos. El hidrogeno es un elemento, el cloruro de sodio un compuesto. Poco después, John Dalton, químico inglés, transportó el concepto del átomo desde el terreno especulativo de la filosofía al campo objetivo de la ciencia, dando a conocer en 1808 sus celebres postulados, de los que perduran dos: Toda materia está compuesta de átomos y todas las combinaciones químicas tienen lugar entre átomos.

Así las cosas, poco después de que Wilhelm Konrad Roentgen (primer premio nobel de física en 1901) descubrió los rayos x (1885), el físico francés Henry Becquerel halló en 1896, de modo fortuito, que las sales de uranio son una fuerte emisora natural de rayos de esencia desconocida, pero sin duda distinta a los rayos x. (Hoy sabemos que son mayormente partículas beta).

Este hallazgo fue confirmado por Marie Sklodowskacurie. Al investigar si en la naturaleza existen otros elementos también dotados de la propiedad de emitir lo que ella denominó "Los rayos de Becquerel", descubrió dicha propiedad en el torio. Becquerel y los esposos curie recibieron el

premio nobel de física de 1903, y Marie Curie recibió también, en 1911, el premio de química.

Vale decir que el fenómeno comprobado, no exclusivo del uranio, configura una forma de energía específica, que ella propuso designar radiactividad. Por tanto, el uranio y el torio, elementos dotados de esa capacidad radiante, natural, se llaman radioelementos. En 1903, Ernest Rutherford (premio nobel de química en 1908) identificó en los radioelementos tres tipos de radiaciones: alfa, beta y gamma.

La estructura del átomo, tal como la concebimos hoy, fue evidenciada paulatinamente durante 35 años. En 1897, Joseph John Thompson (premio nobel de física en 1906) identificó el electrón. En 1911, Rutherford descubrió en el protón y en 1932, James Chadwick (premio nobel de física de 1935) el neutrón, si bien su existencia había sido prevista teóricamente 17 años antes por Rutherford. Hasta 1911, el átomo se concebía como una esfera electropositiva, hueca, que encerraba los electrones electronegativos. La realidad es otra. De hecho, el átomo se asemeja a un sistema planetario con un sol central (el núcleo integrado por protones electropositivos y por neutrones sin carga), y a su alrededor, girando en órbitas, los electrones electronegativos. Tal es la "imagen de Niels Bohr" (premio nobel de física de 1922) que actualmente se acepta.

Reconocida la verdadera estructura del átomo, recordamos que Dalton había enseñado que los átomos de los diferentes elementos tienen pesos y propiedades diferentes. Hoy sabemos que eso no es totalmente exacto, pero esa afirmación lleva implícita un concepto que, expresado a la luz de los conocimientos actuales, equivale a decir que cada elemento tiene un número de protones que le es propio, lo identifica y lo define químicamente, a los que se agrega un número variable de neutrones. Frederick Soddy (premio nobel de química de 1921) propuso denominar isótopos (iso = igual, topos = lugar) a las variantes de cada elemento configuradas por un número igual de protones y distinto de neutrones. Aquellos que emiten radiaciones son isótopos radiactivos o radioisótopos (en la nomenclatura actual, radionucleidos o radionuclidos).

Hasta 1933, sólo se conocían los elementos radiactivos que ofrece la naturaleza; es decir, los elementos provistos de radioactividad natural. Fue entonces que el matrimonio Frederic Joliot e Irene Curie (premio nobel de química de 1935) descubrió la posibilidad de su creación artificial. Lograron mediante el bombardeo con partículas alfa la transmutación del aluminio y del boro estables en fósforo y azoe radioactivos, respectivamente, acontecimiento trascendental que comunicaron a la Academia Francesa el 15 de

Enero de 1934, diciendo que "por primera vez ha sido posible crear la radiactividad en núcleos atómicos estables mediante una causa exterior" y proponiendo llamar a los elementos así creados radiofósforo y radioázoe, respectivamente. Semanas después, Enrico Fermi (premio nobel de física de 1938) realizó en Roma igual hazaña, pero él bombardeó con neutrones - idea genial, pues la neutralidad del neutrón hace de éste el proyectil ideal, porque no lo rechaza la carga positiva del núcleo. Desde entonces se ha podido crear artificialmente isótopos radiactivos y es de éstos que se vale la práctica de la medicina nuclear.

La introducción de las radioisótopos en el campo de la biología se debe a George Von Hevesy (premio nobel de química de 1943) quien, en 1923, utilizando un isótopo natural de plomo, investigó sobre el metabolismo del calcio en las plantas. En 1915, siguiendo la técnica de Fermi, obtuvo fósforo radiactivo (³²P), con el cual realizó en ratas la primera investigación biológica animal de la historia con una radioisótopo artificial. Dicha investigación demostró que la radiactividad proporciona una "marca" que permite su detección donde quiera que se encuentre. Esta condición le sugirió la denominación genérica de sustancias trazadoras radiactivas o trazadores radiactivos.

La creación artificial del radioyodo y el papel trascendente que juega la tiroides en el metabolismo del yodo fueron factores determinantes en la orientación de las primeras investigaciones radioisotópicas. Herz, Roberts y Evans (1939) inyectaron a conejos con yodo radiactivo y comprobaron que se acumula en la tiroides. Hamilton y Soley (1940) administraron ¹³¹I a pacientes, Geiger colocado frente al cuello y detectaron las radiaciones gamma que incidían sobre él; así nació la curva de captación tiroidea de radioyodo. En 1942 Herz y Roberts y, simultáneamente, Hamilton y Lawrence aplicaron el ¹³¹I al tratamiento del hipertiroidismo, tratamiento que, posteriormente, se hizo extensivo al cáncer tiroideo y sus metástasis.

Coincidió con el desarrollo de los progresos enunciados una serie de aplicaciones en el campo de la hematología. Hahn ⁵⁹ (1941) utilizó ⁵⁹Fe y verificó su captación por la médula ósea, su incorporación a los glóbulos rojos, como integrante de la hemoglobina y su pasaje ulterior a la sangre circulante lo que permitía la exploración funcional de la médula ósea. Sterlina y Gray (1950) utilizaron el ⁵¹Cr y, sirviéndose de la propiedad de este de incorporarse de los glóbulos rojos maduros, que así quedaron marcados, procuraron determinar su vida media, parámetro que pasó a ser valioso para el diagnóstico de las anemias hemolíticas. Heinle y Col (1952) ⁶⁰ introdujeron el uso de la vitamina B-12 marcada con ⁶⁰Co para

el diagnóstico de la anemia perniciosa, método que Schilling (1953) perfeccionó.

Con anterioridad a los estudios referidos, Blumgart y Weiss (1927) utilizaron radón - C para determinar la velocidad de la corriente sanguínea. Posteriormente, Frinz metal y Col (1948) registraron la curva del radiocardiograma y Veall y Col (1948) midieron el volumen \ minuto cardiaco.

Por ese entonces, la radiología convencional no ofrecía nuevas posibilidades para la reproducción de imágenes resultantes de contrastes de densidades.

En cambio, los trazadores radiactivos, en función de las emisiones gamma, brindaban a los mismos fines una posibilidad inédita, salvo que su objetivación requería el medio apropiado. La creació del equipo "ad hoc" se debe a Cassen y Col (1949), quienes empezaron por utilizarlo exitosamente en conejos. Poco después, lo empleó Helbert Allen, Jr., en el hombre para obtener las primeras imágenes de los tiroides previa inyección de 100-200 uCi de ¹³¹I. Así nació la centellografía, imagen estática que configura una expresión morfológica, estructural y funcional de la glándula, distinta en su esencia de la imagen radiológica. El equipo, registrado bajo el nombre de Santiscanner (santi=centella, scan=escudrinar), se difundió rápidamente por el mundo,

conservando hasta hoy su vigencia. Es el centellógrafo o gammógrafo lineal o de detector móvil.

Con la invención del centellógrafo se iniciaron investigaciones que tenían por fin la reproducción de la imagen de órganos o sistemas. El "quid" de la cuestión residía en el hallazgo del radionúclido primario o del compuesto marcado, que, reuniendo apropiadas condiciones físicas y de inocuidad, tuviera afinidad selectiva por la estructura del cuerpo que interesaba explorar (órgano de interés). Nació entonces la época de los agentes productores de imágenes ("imaging agents") que dieron impulso a una actividad nueva, la de los radiofarmacos. Rejali (1958) utilizando albúmin ¹³¹I, evidenció los "pools" sanguíneos. Mc'Afee y Wagner (1960) visualizaron el parenquima renal con Neohyclirina ²⁰³Hg, compuesto que Blau y Bender (1960) emplearon para comparar su eficacia en la localización de tumores cerebrales con la de la albúmina radioyodo. Johnson y col (1960) obtuvieron centellogramas de bazo con ⁵¹Cr. Tubis (1960) preparó Hipuran ¹³¹I, con el que inició un tipo de exploración renal funcional "sui generis". El renograma radiosotópico. Corey y col., con ⁴⁷Ca, y Fleming y col., con ⁸⁵Sr (1961) realizaron la centellografía ósea y Blau y Bender (1962) la del páncreas con ⁷⁵selenio metionina. Taplin (1963) creó las partículas de suero - albúmina marcadas con ¹³¹I e inició la centellografía pulmonar por perfusión. Para

concluir este resumen fragmentario, correspondiente destacar el uso del tecnecio - 99m, introducido por Harper y col (1964) para la centellografía de tiroides, bazo y cerebro. Después, se extendió el campo de sus aplicaciones como agente productor de imágenes a casi todas las expresiones de la economía.

La imagen de la centellografía lineal, estática por definición, había satisfecho sus posibilidades y finalidad. Entre tanto, Hal Oscar Anger concibió (1956) la cámara gamma (o de centello) que alcanzó su industrialización en 1964. Con la cámara de Anger de detector fijo, la obtención prácticamente instantánea de la imagen ("fotoscan"), sea en serie continua o selectiva, posibilitó, además, el registro de fenómeno dinámicos.

Después de comprobar que la insulina tiene propiedades antigénicas y produce anticuerpos, Berson y Yalow desarrollaron en 1956 el radioinmunoanálisis (RIA) que, conjugando técnicas inmunológicas y bioquímicas (10 g₋₉) hasta el picogramo (10 g₋₁₂). Mediante el RIA, es dado hoy precisar el valor de más de 200 compuestos de intereses biológicos, entre ellos hormonas, enzimas, virus, alcaloides, fármacos, etc.

Terminamos aquí la recordación, que, aunque incompleta abarca

en lo esencial los antecedentes, la concepción, el alumbramiento y el desarrollo de nueva disciplina científica y técnica que constituye una de las expresiones, sin duda la más humana, en el desarrollo no siempre generoso de las aplicaciones de los radioelementos en nuestra era nuclear con sus raíces en el siglo pasado, hace eclosión a mediados del presente con una pujanza que cristaliza constantemente en nuevas adquisiciones en todos los campos de la investigación básica y aplicada y aún ofrece perspectivas trascendentes.

II. INTRODUCCION A LA FISICA NUCLEAR

La materia que nos rodea está constituida por sustancias simples y compuestas, son llamados elementos y existen 98 en estado natural y que van desde el hidrógeno, el más liviano, hasta el Uranio, el más pesado.

Los elementos están constituidos por átomos idénticos entre si, que son la menor fracción de materia posible de aislar por métodos químicos y que poseen todas las características físicas y químicas propias del elemento al que pertenecen. Esta definición no se ajusta literalmente a las características de los elementos biatómicos: - Oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2) - cloro (Cl_2) - yodo (I_2) - Flour (F_2) - bromo (Br_2), cuyas propiedades son las de las moléculas respectivas.

Los átomos están constituidos por un núcleo integrado por asociación de partículas elementales, llamadas genéricamente nucleones, que son los protones de carga eléctrica positiva y los neutrones que no tienen carga. Girando alrededor del núcleo, en igual número de protones, están los electrones con

carga eléctrica negativa, los cuales neutralizan la posibilidad de núcleo. De este modo el átomo, eléctricamente neutro, configura un sistema planetario en el cual el núcleo hace papel de sol y los electrones el de los planetas, tal es llamada Imagen de Bohr actualmente aceptada. Por medio de movimiento cósmico (atómico) entre protones, neutrones y electrones estos hacen que se produzca energía; esta energía emitida se traslada en forma de fotones con movimientos ondulatorios y así emite ondas. Una onda se denomina al conjunto de la cresta y un valle. Ejemplo se forma una onda al lanzar una piedra a un charco la parte que se eleva es la cresta y la parte que se abre es el valle y dependiendo del número de átomo y de su equivalencia la onda será más larga, o sea, esto depende de la energía que se produce al estimular un átomo produciendo vibración de partículas, (en un medio sólido - líquido o gaseoso) y dependiendo de sus electrones la onda será más larga y produce más energía; la longitud de onda es la distancia entre dos puntos correspondientes sucesivos de la curva. Estas distancias pueden ser metros o se pueden medir en unidades A (Amstrong).

Este esquema planetario de protones, electrones, neutrones; no es más conocido como mantienen unidos a los nucleones entre sí, y, aparentemente, las atracciones másicas no podrían superar la repulsión coulombiana debida a las cargas

positiva. Hoy en día se supone que la unión de los nucleones se complementa mediante el intercambio de partículas intranucleares llamadas mesones, cuya masa es del orden de 0.05 a 0.15 u.m.a.

Considerando que la medida de los radios nucleares varía entre 1.4×10^{-13} cm y 9.5×10^{-13} cm y que el peso de un núcleo intermedio es de alrededor de 10^{-22} g, la densidad nuclear será del orden de 10^{14} g/cm³, o sea, 10^8 ton/cm³, valor que por su elevada magnitud no admite comparación con ninguna otra densidad de materia. Teniendo en cuenta, además, que las energías nucleares tienen muy poco radio de acción (aproximadamente 10^{-13} cm), debe admitirse que existe entre los nucleones algún tipo de fuerzas de atracción muy particular.

La letra Z designa el número de protones integrantes un núcleo y este número identifica químicamente los diferentes elementos. Este valor se denomina número atómico o de orden y es diferente para cada elemento. Así, si un elemento tiene Z=20, es calcio; Z=53, yodo; Z=80, mercurio, etc. El número de neutrones se designa con la letra N y la suma de Z + N (masa atómica) da A, que se denomina número másico o de masa.

Con estos valores del núcleo, el átomo correspondiente queda

identificado. Convencionalmente, se utiliza la siguiente notación: $\begin{matrix} A \\ X \\ Z \end{matrix}$ (por ejemplo, el cobalto, $\begin{matrix} 60 \\ \text{Co} \\ 27 \end{matrix}$), o sea, el símbolo del elemento precedido por A (cifra superior) y por Z (cifra inferior).

El resto del átomo está integrado, según se dijo antes, por los electrones orbitales (en igual número que los protones) que, como los nucleones, son considerados partículas elementales. Su masa es aproximadamente 1850 veces menor que la del protón o del neutrón (masa en reposo del electrón: 5.4860×10^{-4} u.m.a., que equivale a 9.1091×10^{-28} g). Su carga es igual pero contraria a la del protón y su radio es del orden de 3×10^{-13} cm.

Los electrones, que giran alrededor del núcleo describiendo órbitas elípticas, se encuentran ubicados en capas perfectamente determinadas. Las capas difieren entre sí por su nivel energético y se designan en orden desde la más interna hacia afuera, con las letras K, L, M, etc. Los electrones de las capas externas tienen a su cargo las uniones químicas con otros elementos. Salvo en dos situaciones definidas que veremos más adelante, los electrones orbitales no intervienen en los fenómenos nucleares.

El radio del átomo así constituido es del orden de 10^{-8} y su

masa está prácticamente concentrada en el núcleo. Entonces, si a modo de hipótesis imaginamos que el núcleo tiene radio de un milímetro, el radio del átomo será aproximadamente 10 metros. De esto se infiere que los cuerpos que nos rodean son virtualmente huecos (pese a la gran solidez propia de algunos) aunque no lo parezcan, ya que la materia de la cual se componen se halla concentrada en puntos aislados, separados por vacíos enormes en relación con sus dimensiones.

Se entiende por especie atómica, también llamada núclido o nucleido, una determinada clase de átomos caracterizada por una estructura típica y un contenido energético propios de esa especie, siendo los parámetros que la definen Z , A y Q (Q representa el contenido energético).

Dijimos que el número atómico, Z , identifica químicamente al elemento, de modo que cuando $Z=1$ sabemos que se trata de hidrógeno y cuando $Z=53$ se trata de yodo. Sin embargo, los núclidos pueden tener igual Z y diferente A porque difieren en el número de neutrones. Por ejemplo, sabemos que del yodo existen 23 variedades, que van desde el ¹¹⁷I hasta el ¹³⁹I, todas con igual comportamiento químico (hasta tal punto que el organismo no las discrimina), pero se diferencian en algunas de sus propiedades físicas. Decimos en este caso que los núclidos de igual Z son isótopos (de iso, igual, y topos, lugar, en la tabla periódica de Mendeleev).

Aquellos núclidos que tienen el mismo A y diferente Z son isóbaros entre sí. Según veremos, los productos de desintegración B son isóbaros. Son isómeros los núclidos que tienen igual Z y A , pero que difieren por el contenido energético del núcleo. Los núclidos que tienen igual N se llaman isótonos. Finalmente, se llaman isodiáferos los núclidos en los cuales la diferencia $N - Z$ es constante.

Al referirnos a la masa de las partículas elementales - protón, neutrón y electrón - hemos empleado como unidades la unidad de masa atómica o el gramo-masa. Pero de acuerdo con la teoría de relatividad de Einstein, la relación entre la masa (m) y la energía (E) es : $E = mc^2$, donde c es la velocidad de la luz. Entonces, conforme a esta ley, podemos expresar la masa en unidades de energía.

En física nuclear, la unidad de energía más empleada es el electronvolt (eV), que equivale a la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado dentro de un campo eléctrico cuya diferencia de potencial es de un volt. Un eV tiene su equivalente en unidades de energía en el sistema cegesimal (c.g.s.): $1\ eV = 1.6 \times 10^{-12}$ erg.

También se emplean comúnmente el MeV (megaelectronvolt), igual a 10^6 eV , y el keV (kiloelectronvolt), igual a 10^3 eV .

A modo de ejemplo, puede calcularse el equivalente en energía de la unidad de masa atómica. Si toda la masa equivalente a 1 u.m.a. se transformara en energía, se obtendría 0.00149 ergios, o sea, 931 MeV. Haciendo el cálculo para la masa de un electrón, obtendremos $m_e = 0.51$ MeV, valor que importa recordar cuando se habla de emisión de positrones.

2.1. TIPOS DE RADIACION

La radiación la podemos clasificar de la siguiente manera: Las radiaciones que los podemos clasificar en dos tipos: a) naturales y b) artificiales. Las radiaciones naturales son aquellas que vienen de fuera y las artificiales son las que vienen de dentro. Las podemos dividir en: a) cósmicas que son las que vienen o están con nosotros permanentemente alrededor como la luz solar, etc. (viene de afuera) y b) terrestres; ésta a su vez la podemos dividir en radiaciones internas y externas. Internas son aquellas en que se habla de iones radiactivos, o sea, cuerpos radiactivos, sobre la naturaleza de estas radiaciones se sabe que partículas α (alfa) son átomos de Helio desprovistos de sus electrones, o sea, que son asociaciones de dos protones y dos neutrones. Y de partículas β (beta) que son partículas dotadas de alta velocidad. Estos iones radiactivos son los que utilizamos en la

medicina nuclear. Ejemplos; el yodo y el bromo, etc. Las externas son aquellas radiaciones encontradas en las minas de metales.

ARTIFICIALES:

Son aquellas que el hombre produce a través de aparatos. Entre estas tenemos los rayos X, los gamma al igual que la eléctrica, la radiante (luz visible).

También hay radiaciones que las podemos clasificar por su naturaleza, composición en radiación corpuscular y electromagnética. Y esta puede estar representada tanto natural como artificial. La radiación corpuscular está compuesta por partículas que contienen masa; ejemplo: la corriente eléctrica que es flujo de electrones de un átomo siempre y cuando haya diferencia de potencial, o sea, rayos catódicos.

La radiación electromagnética a diferencia de la corpuscular no posee masa, se propaga por medio de cuerpos eléctricos y magnéticos, su propagación es rectilínea debido a que no posee masa. Ejemplo la luz y el sonido.

2.1.1. RADIOACTIVIDAD

Los primeros estudios realizados con sustancias radiactivas revelaron que las mismas emitían tres tipos de radiaciones diferentes que fueron llamadas α , β y γ , respectivamente. En investigaciones posteriores sobre la naturaleza de estas radiaciones, se comprobó que las partículas α eran átomos de helio desprovistos de sus electrones, o sea, la asociación de dos protones y dos neutrones. Las partículas β fueron identificadas como electrones dotados de alta velocidad, esto es, con una energía superior a la de su masa en reposo (como veremos, existen partículas β^- negativas y β^+ positivas). Finalmente, la radiación γ fue identificada como una radiación electromagnética sin masa ni carga.

Progresivos descubrimientos vinculados con la radiactividad revelaron que la presencia del neutrón está directamente relacionada con la estabilidad nuclear, de manera tal que cuando la relación Z/N es igual o próxima a 1, el núcleo es estable.

Esta relación se cumple casi estrictamente en los núcleos livianos, mientras que a medida que aumenta Z la línea de estabilidad va alejándose de la relación teórica, hasta tal punto que a partir de $Z=83$ ya no hay núcleos estables; es decir, que de allí en adelante todos son radiactivos. En suma, la estabilidad o inestabilidad del núcleo que sea está determinada por su mayor o menor proximidad a la línea de estabilidad y, en definitiva, es función de la relación protones-neutrones.

Cuanto más alejado de la línea de estabilidad esté un núclido, tanto más inestable será. Dicha inestabilidad se manifestará por una mayor energía de las partículas emitidas y por un periodo de semidesintegración menor. A la inversa, cuanto más cerca de la línea de estabilidad se encuentre, tanto mayor será su estabilidad, tanto menor la energía de las partículas emitidas y tanto más largo el periodo de semidesintegración. Estos conceptos corresponden a una generalización de la ley de Geiger y Nuttal.

La inestabilidad de un núcleo (y, por tanto, la del átomo correspondiente) se pone de manifiesto por la emisión de partículas y esta emisión lo hace tender hacia la estabilidad, a través de una o más transformaciones sucesivas. Si tenemos cierto número N_{PV} de átomos radiactivos en el instante $t=0$, al cabo de cierto tiempo, en el instante t , tendremos el número de átomos N_t menor que el anterior, pues algunos de ellos se habrán transformado en otros, por emisión de partículas.

Definimos el período de semidesintegración, mencionado anteriormente, como el tiempo en que un número de átomos de una especie radiactiva se reduce a la mitad por desintegración. Así, si en un instante dado existen 100 átomos de ^{131}I y al cabo de 8.05 días encontramos 50, decimos que el período de semidesintegración del ^{131}I es igual a 8.05 días:

$$T_{1/2} (^{131}\text{I}) = 8.05 \text{ días}$$

También podemos definir el período de semidesintegración como el tiempo en que la actividad de una fuente radiactiva se reduce a la mitad. Los periodos de semidesintegración de los núclidos conocidos van desde microsegundos hasta valores de más de 10^{15} años.

De acuerdo con lo expresado, podemos decir que la velocidad de desintegración, o sea, el número de átomos dN que se desintegran en un instante dt es proporcional al número de átomos activos presentes.

Frecuentemente en la rutina diaria se suele utilizar la expresión vida media como equivalente de periodo de semidesintegración, lo que constituye un error. Este error proviene de una mala traducción del inglés, en el cual al $T_{1/2}$ se le llama "half life". La expresión "vida media" corresponde a la inglesa "mean life", que significa el promedio de vida de todos los núcleos radiactivos de una fuente dada y se

representa por t .

Semiperíodo efectivo, en contraste con el semiperíodo físico, es el tiempo medio ($T_{1/2}$) de la permanencia del radionuclido en el organismo.

La actividad de una fuente suele expresarse por el número de desintegraciones por minuto o segundo. Cuando se habla de "actividad" en términos de desintegraciones por unidad de tiempo, se está refiriendo a la actividad absoluta de esa fuente. En general, cuando se mide una fuente, la actividad que se determina no es la actividad absoluta, puesto que, a menos que la medición se realice con un contador envolvente (de geometría 4 π) y en condiciones rigurosas, la medición no tendrá un rendimiento del 100%. Por tanto, la actividad medida por un equipo corriente es la denominada actividad relativa, que se expresa en cuentas por unidad de tiempo (cuentas/minuto o cuentas/segundo).

Otra manera de expresar la actividad es la unidad Curie (Ci). Esta unidad Originó en 1910 en el Congreso Internacional de Radiología de Bruselas y se basa en el número de desintegraciones por segundo de 1 gramo de radio en equilibrio con radón. El valor determinado entonces era de 3.61×10^{10} desintegraciones por segundo. Mediciones posteriores dieron valores ligeramente diferentes, por lo que en 1930 se decidió establecer por definición que:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ desintegraciones por segundo.}$$

En general, sobre todo en aplicaciones de la medicina nuclear, el curie resulta una unidad demasiado grande, por lo que se utilizan los submúltiplos: el milicurie (mCi) y el microcurie (uCi):

$$1 \text{ Ci} = 10^3 \text{ mCi} = 10^6 \text{ uCi.}$$

Ahora bien, cuando se mide una fuente, ha de saberse que solo una pequeña fracción de los átomos, y no todos ellos, son radiactivos. Esto se debe a factores vinculados a su producción y/o su preparación. A modo de ejemplo, consideremos la producción de Co_{60} (cobalto 60) en un reactor:



Es decir, el elemento estable cobalto 59, al capturar un neutrón, produce cobalto 60 y un fotón, o sea, un rayo γ .

Al exponer cierta cantidad de cobalto 59 al flujo de neutrones en un reactor, no todos sus átomos captarán neutrones y el número de los que lo hagan dependerá de la intensidad del flujo de neutrones incidente (número de neutrones / cm^2 seg) y del tiempo en que estén expuestos a él. Además, como es imposible separar químicamente Co_{59} de Co_{60} , resulta que en las fuentes de Co_{60} siempre habría también Co_{59} .

En otros casos en que es posible obtener una especie radiactiva pura, ésta en general es de una cantidad ponderalmente tan pequeña (por ejemplo, 1 mCi de P^{32} pesa aproximadamente 3.4×10^{-9} g) que es imposible manipularla en su uso ulterior, de modo que se hace necesario agregarle una cantidad adecuada del elemento estable correspondiente, que actúa como portador o vehículo ("carrier") de los átomos activos.

Esta circunstancia hace necesario introducir un nuevo concepto, que es el de la actividad específica, que se define para una determinada fuente radiactiva como la actividad por unidad de peso y se expresa, por ejemplo, como mCi/g; desintegraciones/seg mg; etc.

El concepto de actividad específica adquiere particular importancia en medicina nuclear, donde, en general deben usarse altas actividades específicas. Por ejemplo, sería

imposible diagnosticar un tumor cerebral utilizando el núclido ^{74}As (arsénico 74) si, teniendo que aplicar a un paciente 50 μCi del mismo, utilizáramos una fuente con una actividad específica de ^{74}As de 10 $\mu\text{Ci/g}$, puesto que tendríamos que inyectar 5g de arsénico, dosis altamente tóxica. si, por el contrario, disponemos de una fuente con una actividad específica de 100 $\mu\text{Ci/mg}$, esta no causará ningún problema, ya que 50 μCi , la dosis requerida, está contenida en 0.5 mg de arsénico.

Desintegración α

La desintegración se presenta, salvo algunas excepciones, en los núcleos pesados ($Z \geq 82$). Los periodos de semidesintegración de los emisores varían entre 10^{-7} y 10^{15} años, y sus energías entre 1.80 MeV y 9.02 MeV. Cuando un núcleo emite una partícula α (asociación de 2 protones y 2 neutrones), Z baja en dos unidades y A en cuatro:



Por consiguiente, desde el punto de vista de la relación Z/N , la situación no cambia, ya que no hay un acercamiento a la línea de estabilidad. Sin embargo, en los núcleos pesados, la emisión de una partícula α significa una pequeña ganancia de energía para el núcleo restante, lo cual favorece en parte su estabilidad y puede colocarlo en condiciones de producir otro tipo de emisión, según veremos.

Una de las características de las partículas α emitidas por un radionúclido es que son monoenergéticas, lo que implica que, si la diferencia entre los dos estados energéticos, de los núcleos madre e hija es de 6MeV (cuando tenemos $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow$ denominados a A madre, B hija y C nieta, etc), todas las partículas

emitidas por la madre tendrán 6MeV de energía.

No obstante, nos encontramos frecuentemente con emisores α en los cuales las partículas no tienen la energía correspondiente a la transición de un estado al otro; o sea, que tomando el caso anterior, cierto porcentaje de las partículas α , en lugar de tener 6MeV, tendrán, por ejemplo, 5.5. MeV. En ese caso la diferencia de energía entre 5.5. MeV y 6MeV es completada por un fotón y de 0.5 MEV, que se dice es emitido "en cascada" junto con la partícula α de menor energía.

También puede darse el caso en que existan emisores con un solo tipo de partículas α , pero estas no contengan toda la energía de la transición, por lo cual serán seguidas por un fotón y que completar la cantidad restante de energía.

Es debido a este mecanismo que, en

general, las partículas α y β (como veremos) β van acompañadas de fotones γ .

Las partículas α , por su gran masa y su doble carga positiva, tienen a lo largo de su trayecto un alto poder de ionización, y por tanto, un rango de penetración muy limitado en la materia. Una simple hoja de papel frena las partículas α de los emisores conocidos.

Desintegración β -

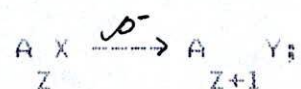
Cuando un núcleo tiene exceso de neutrones, emite una partícula β^- que, como se definió, es un electrón dotado de alta energía. Dado que el electrón no es constituyente del núcleo, esta emisión puede ser explicada como si se tratara de un neutrón en exceso que se transformara en un protón más una β^- , según la ecuación:

$$n = p^+ + \beta^- + Q$$

Q es la energía de la reacción, que

puede ser tomada o cedida al núcleo.

El núcleo hija resultante de una desintegración β^- tendrá Z una unidad mayor que la madre, puesto que ha ganado un protón, mientras A permanecerá constante. Por consiguiente tenemos:



X e Y son isóbaros, así como también lo son el molibdeno 99 y el tecnecio 99.

A diferencia de las partículas α , las β^- no son monoenergéticas, sino que presentan un espectro de energías que van desde 0 hasta la energía máxima del núclido correspondiente ($E_{\beta^- \text{ máx}}$) que figura en tablas de las mismas. Por tanto, si tomamos como ejemplo la desintegración del fósforo 32,



La diferencia de energía entre los dos estados (P y S) es de 1.7 MeV. Dado que el fósforo 32 no tiene , toda la energía de transformación deben llevarla las partículas β^- . No obstante, solo pocas de ellas alcanzan dicha energía (1.7 MeV) y por tanto, debe existir algún mecanismo mediante el cual se emita la energía restante. Ese mecanismo consiste en la emisión simultánea con la β^- de un neutrino (ν), partícula de masa despreciable (aproximadamente 0.5% de la de un electrón) y sin carga, pero con una energía igual a la diferencia entre la energía máxima de transición y la de la partícula β^- correspondiente. En consecuencia, para un núclido emisor β^- la energía de los neutrinos variará entre la energía máxima y cero de la siguiente manera:

$$E_{\beta^- \text{ máx}} = E_{\beta^-} + E_{\nu}$$

Por otra parte, y al igual que con las partículas α , si la energía máxima de una transición β^- no alcanza el valor de

la diferencia entre los dos estados fundamentales, será acompañada por un fotón γ .

De manera que si tenemos



entonces,

$$E_x - E_y = E_{\rho^+} - E_{\rho^-} + E_\gamma.$$

E_{ρ^-} máx.

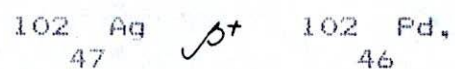
Existen emisores ρ^- naturales, aunque la mayoría son artificiales y, a diferencia de los emisores α , se encuentran a todo lo largo de la tabla periódica. Sus periodos de semidesintegración varían entre algunos milisegundos y ¹²10 años y sus energías entre 0.01 a 10 MeV. Las partículas ρ^- , por su menor masa y carga, tienen menor poder de ionización y mayor poder de penetración que las partículas α .

Desintegración β^+ (positrones)

Cuando un núcleo tiene un déficit de neutrones respecto a la relación Z/N correspondiente, emite una partícula β^+ . El fenómeno en este caso se interpreta como si uno de los protones en exceso se transformara en un neutrón más una partícula β^+ :

$$p = n + \beta^+ + \nu$$

En la desintegración se tiene



por lo cual, X e Y son isóbaros y este proceso tenderá a la línea de estabilidad.

La desintegración β^+ , al igual que la β^- no es monoenergética y, en consecuencia, también genera neutrinos. Cuando la

energía máxima de β^+ ($E_{\beta^+ \text{ máx}}$) es menor que la diferencia de energía de transición entre los dos estados fundamentales, se emiten fotones en cascada según explicamos anteriormente para la desintegración α y β^- .

La diferencia fundamental con la desintegración β^- es que la partícula β^+ , también llamada positrón, una vez emitida, tiene muy escasa posibilidad de vida. Puesto que es un electrón positivo, encontrará en seguida un electrón negativo en la materia circundante y ambos se aniquilarán entre sí, transformando sus masas en energías, en forma de fotones γ de 0.51 MeV cada uno y de dirección opuesta en 180 grados (como se vio anteriormente el equivalente energético de la masa de un electrón es de 0.51 MeV). Por consiguiente, en la práctica, los emisores de positrones se utilizan en función de los fotones de aniquilación y no de las partículas .

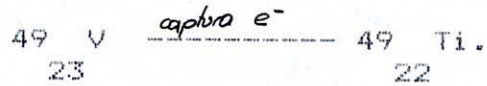
Los núclidos emisores β^+ no se encuentran en la naturaleza sino que son obtenidos artificialmente mediante diversas reacciones nucleares.

Captura electrónica

Cuando un núcleo tiene exceso de protones, no siempre se desintegra por β^+ . En algunos casos, dependiendo de la configuración interna del núcleo, puede darse el fenómeno de captura electrónica. En ésta, el núcleo atrae hacia sí uno de los electrones orbitales, que se unirá a uno de los protones.



El resultado final es el mismo que si el núcleo emitiera una β^+ , o sea, que Z disminuye en una unidad y A permanece constante.



Si bien cualquiera de los electrones orbitales puede ser capturado por el núcleo, lo más probable es que sea un electrón de la capa K, que es la más cercana, por lo que el fenómeno es conocido como captura K.

Dado que en este caso no se emite partícula alguna, el proceso se detecta por los llamados rayos X característicos, provenientes de la reacomodación de las capas electrónicas. Esto es, cuando el electrón es capturado por el núcleo, deja un hueco que será llenado por otro electrón de una capa superior, el cual cederá al medio la energía de unión sobrante en forma de rayo X. A su vez, el hueco dejado por este segundo electrón será llenado por otro, y así sucesivamente hasta llegar a la última capa.

Emisión γ

Dijimos que los fotones acompañan a la desintegración α y β cuando estas partículas no llevan consigo toda la energía correspondiente a la transición entre dos estados fundamentales. Entonces dichos fotones son emitidos simultáneamente con las partículas correspondientes.

Sin embargo, hay estados "excitados" de los núcleos que tienen cierto tiempo de vida, el cual depende de su inestabilidad. Estos estados "excitados" también llamados isoméricos o isómeros, pasan al estado fundamental por emisión de fotones:



La m simboliza el estado metaestable; es decir, de alta inestabilidad.

El período de semidesintegración de los isómeros y la energía de los fotones emitidos dependen de la energía de excitación de los mismos. Los fotones, por no poseer masa ni carga, tienen muy bajo poder de ionización, y por consiguiente, un gran poder de penetración en la materia.

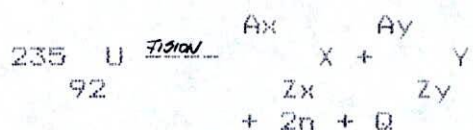
Conversión interna

En casos muy particulares, se observan núclidos que emiten electrones monoenergéticos (por ejemplo ^{58}Co). En tales situaciones, el fenómeno acaecido es el siguiente: en algunos emisores γ de baja energía (menor que 0.1 MeV), puede suceder que los fotones interaccionen con electrones orbitales, arrancándolos y transfiriéndoles toda su energía. El resultado es la creación de un haz de electrones monoenergéticos. Este fenómeno y el de la captura electrónica son, según anticipamos, los dos únicos casos en los cuales los electrones orbitales participan de un

fenómeno nuclear.

Fisión

Como último tipo de desintegración citaremos la fisión nuclear. En los núcleos muy pesados ($Z > 90$) la inestabilidad es tan grande que éstos, en vez de desintegrarse por emisión de partículas, pueden fraccionarse en dos partes, generalmente desiguales, emitiendo dos o tres neutrones y liberando gran cantidad de energía ;



(Q = energía liberada en la fisión)

$$Z_x + Z_y = 92 ; \quad A_x + A_y = 233.$$

X e Y son los llamados productos de fisión y sus Z están comprendidos entre 30 y 60. Como son todavía inestables con exceso de neutrones, tienden a la estabilidad por sucesivas emisiones β^- , formando cadenas de isóbaros.

2.1.2. RADIACIONES IONIZANTES

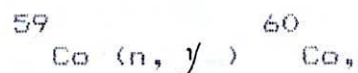
Vistas las características fundamentales de los radioisótopos y las posibilidades de su utilización, interesa considerar la forma de su producción.

Para producir un radionúclido a partir de un isótopo estable, es necesario provocar en éste una alteración en la relación Z/N . En otras palabras, es necesario agregar o sacar protones o neutrones del núcleo, de tal manera que éste se transforme en otra entidad, física y, a veces, químicamente diferente. Esto se logra mediante reacciones nucleares adecuadas, provocadas por el bombardeo del núcleo con un determinado tipo de partículas. al núcleo bombardeado se le llama blanco y a la partícula bombardeante, proyectil. Entre los proyectiles más utilizados figuran los neutrones, protones, deuterones, fotones gamma, etc.

Un ejemplo típico de una reacción nuclear es la producción de ^{60}Co que se citó al hablar de la actividad específica.



Estas reacciones suelen representarse de la siguiente manera"



lo cual, significa esquemáticamente que, cuando se bombardea el núcleo X con una partícula a, se obtiene el núcleo Y más la partícula b,

$$X = (a, b) Y.$$

Los proyectiles antes mencionados pueden obtenerse en reactores nucleares o en aceleradores de partículas. Un reactor nuclear se basa en la reacción de fisión explicada anteriormente.

Los átomos de ^{235}U pueden desintegrarse por emisión alfa o fisión espontáneamente. Pero si un neutrón choca con el núcleo de ^{235}U , este, indefectiblemente, fisionará. Una masa crítica de uranio es aquella que puede mantener una reacción en cadena; esto es, una reacción en la que cada uno de los neutrones liberados en cada fisión incida sobre otros tantos núcleos de ^{235}U , provocando la fisión de los mismos, y así sucesivamente.

En un reactor se tiene una masa crítica de uranio, generalmente en forma de barras (llamadas elementos combustibles) dispuestas dentro de un medio llamado moderador. Este conjunto constituye el núcleo del reactor. El moderador tiene por objeto disminuir la energía de los neutrones de fisión, para llevarlos al valor óptimo (0.03 eV) para producir nuevas fisiones. El moderador puede ser agua liviana, agua pesada, grafito, polietileno, etc.

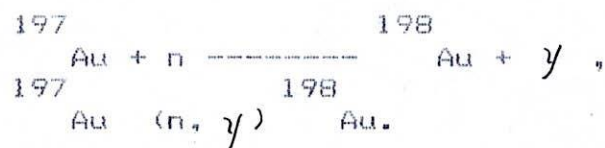
Para controlar el número de fisiones y, por ende, la potencia de un reactor, se utilizan las llamadas barras de control, constituidas por materiales como el cadmio que tienen una alta competencia con el uranio en cuanto a la captura de neutrones. Por consiguiente, si se introducen dentro de un reactor las barras de control, los neutrones liberados en las fisiones serán capturados por estas barras, impidiendo en su proximidad la prosecución de la reacción en cadena. De manera que la mayor o menor introducción de las barras de control en el reactor redunda en una menor o mayor potencia, respectivamente, de éste en su trabajo.

Dado que en cada fisión se libera una gran cantidad de energía, el reactor debe poseer un circuito de refrigeración que permita extraer el calor generado en el núcleo. Un reactor debe tener también, alrededor del núcleo, un reflector que le devuelva los neutrones

que, de otro modo, escaparían del mismo y, a su vez, todo el reactor debe estar rodeado de un blindaje biológico que impida la irradiación hacia el exterior. Estos blindajes son, en general, de hormigón pesado.

Hay diferentes tipos de reactores: los de experimentación, los de producción de radioisótopos y los de producción de energía.

Los reactores de producción de radioisótopos están diseñados de tal manera que los neutrones disponibles en exceso puedan ser utilizados como proyectiles para la preparación de radioisótopos a partir de la reacción (n, γ) . Es por esta razón que sólo pueden producir radioisótopos en un reactor cuando hay exceso de neutrones.



El ejemplo anterior corresponde a la

producción de Au. Para esto se coloca en los canales del reactor destinados a irradiación una cantidad dada de oro metálico que se deja expuesto al bombardeo de neutrones el tiempo necesario para obtener la actividad requerida. Dicha actividad es función, además, de la cantidad de oro irradiado y del flujo de neutrones presentes en la zona de irradiación² (expresado en $n/cm^2 \text{ seg}$).

El material obtenido puede usarse, según los casos, tal cual sale del reactor o luego de ser sometido a un proceso químico. Siguiendo con este ejemplo, el Au radiactivo puede utilizarse en la forma obtenida (caso de semillas para implantación de tumores), o bien, después de una transformación (coloides para aplicaciones intracavitarias).

Cuando hay que obtener radionúclidos que no puedan lograrse por la reacción (n, γ) , se recurre a otro tipo de reacciones nucleares, empleando

otras partículas (las más frecuentes: protones, deuterones, o alfa). En tal caso se utiliza un acelerador de partículas. El acelerador más utilizado para la producción de radionúclidos es el ciclotrón, que se basa en el principio siguiente: Cuando una partícula cargada se inyecta dentro de un campo magnético, describe una trayectoria circular cuyo radio es función del valor del campo, de la masa y carga de la partícula, y de la energía con que ésta es inyectada en el campo.

El ciclotrón consiste en un sistema al vacío en cuyo interior hay dos electrodos en forma de "D", ligeramente separados, entre los cuales puede establecerse alternativamente una diferencia de potencial. Este conjunto está colocado entre los polos de un electroimán que crea el campo magnético adecuado para que, cuando se inyectan en el sistema partículas cargadas, éstas describan una trayectoria circular. El sistema está dispuesto de manera tal que

cada vez que un conjunto de partículas llega al espacio de separación entre los electrodos, cambia la polaridad de los mismos y las partículas sufren una aceleración al pasar de un "D" a la otra (la aceleración es debida a la atracción producida entre la carga de la partícula y la del electrodo). Al entrar en la segunda "D", el radio de la trayectoria será mayor, dado que las partículas han sufrido un incremento de energía. Recorrida la semicircunferencia dentro de la "D", llegan nuevamente a la separación entre esta y la primera. Allí, vuelve a producirse un cambio de polaridad y las partículas sufren una nueva aceleración, aumentando otra vez su radio de curvatura en la otra "D". Este fenómeno se repite cierto número de veces, hasta que las partículas lleguen a la periferia del sistema, y allí inciden con la energía adquirida sobre el blanco que se quiere irradiar. De esta manera se logran las reacciones nucleares deseadas.

Un ejemplo de producción en el ciclotrón es la preparación de ^{11}C a partir de ^{10}B bombardeado con deuterones:



Los radionúclidos producidos en el ciclotrón deben separarse químicamente del blanco irradiado, pues en las reacciones nucleares con partículas cargadas hay, en general, un cambio de Z .

2.1.3. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

Cuando la radiación incide en la materia se producen colisiones con los núcleos atómicos, con los electrones orbitales, con partículas libres o con el campo eléctrico que rodea al núcleo. Las colisiones pueden ser elásticas o inelásticas, según se mantenga constante o no la energía cinética del sistema.

El fenómeno más común es la ionización, en la

cual la partícula incidente arranca un electrón orbital de una de las moléculas del material en cuestión, cediendo parte de su energía y formando un par de iones: el electrón y el resto de la molécula.

La energía requerida para formar un par de iones, por ejemplo, en el aire, es de alrededor de 32 eV. Por tanto, si la partícula incidente tiene solamente esta energía, se limita a formar un par de iones. Si tiene más, continuará formando pares de iones a lo largo de su recorrido, hasta consumir totalmente su energía.

Por otra parte, hay que considerar que la partícula incidente también transfiere al electrón arrancado cierta cantidad de energía en forma de energía cinética. En consecuencia, los electrones arrancados, dotados de energía, son capaces de producir ionizaciones secundarias.

Partículas α

La interacción de estas partículas con la

materia ocurre en general al nivel de los electrones orbitales y produce fundamentalmente ionización y excitación.

La ionización específica (número de pares de iones formados por unidad de recorrido) para estas partículas es muy alta. Esto quiere decir que consumen toda su energía en un recorrido muy corto, y por tanto, su alcance es muy reducido.

El trazado dejado por una partícula α en una placa fotográfica es corto, recto y de gran densidad de velado. Esto se debe a que, como es una partícula de gran masa y con dos cargas positivas, su probabilidad de interacción con electrones orbitales es muy alta.

En general, la energía de las partículas alfa emitidas por los radioisótopos conocidos varia entre 3 y 8 MeV y su alcance en el aire, a presión y temperatura normales, es aproximadamente igual a su energía expresada en cm; por tanto, su alcance en el aire variará entre 3 y 8 cm. En cualquier otro

medio de mayor densidad, su alcance será mucho menor. Cuando la partícula pierde toda su energía, toma dos electrones del medio que la rodea, convirtiéndose en un átomo de He.

De lo expuesto se deduce que los α emisores no presentan peligro como fuentes de irradiación externa, dado que las partículas emitidas serán frenadas por pocos cm de aire. Sin embargo, desde el punto de vista de fuentes internas, son las más peligrosas por su alto poder de ionización localizado.

Partículas β^-

Las partículas β^- pueden interaccionar de diferentes maneras con la materia, aunque, como en el caso de las partículas α , la interacción es más probable ocurre al nivel de los electrones orbitales y provoca la formación de pares de iones.

Dado que la partícula β^- tiene masa aproximadamente 8000 veces menor que la partícula α y la mitad de la carga de ésta,

su ionización específica será menor, y, por tanto, mayor su alcance en la materia.

Como fuente interna de irradiación las partículas no causan un daño tan localizado como las α , y desde el punto de vista externo, si bien las partículas β^- normalmente emitidas por los radionúclidos conocidos tienen un alcance en el aire mucho más grande que las partículas α , son fácilmente detenidas con unos pocos milímetros de aluminio o lucite.

Las partículas β^- pueden también interaccionar elásticamente con los núcleos atómicos, fenómeno conocido como dispersión de Rutherford. Dicho fenómeno se manifiesta notablemente en la llamada retrodispersión (o "backscattering") que debe tenerse en cuenta cuando se miden emisores.

Cuando las partículas β^- tienen alta energía, pueden producirse choques inelásticos con los núcleos. El electrón pierde velocidad por acción del campo eléctrico del núcleo y parte de esa energía es convertida en radiación

electromagnética. Este fenómeno es la radiación de frenamiento (o "Bremsstrahlung") y es característico de la energía de las partículas β^- y del material con el cual interaccionan. En el agua, dicha radiación se manifiesta como una luz azulada muy típica.

Partículas β^+

Tienen el mismo tipo de interacción que las partículas β^- , salvo que cuando ya han perdido toda su energía cinética, se aniquilan con un electrón del medio absorbente, originando dos fotones, de 0.51 MeV cada uno, que corresponden al equivalente en energía de la masa de cada electrón.

Fotones γ

La radiación electromagnética puede interaccionar con la materia según tres mecanismos. La probabilidad de que ocurra uno u otro depende fundamentalmente de la energía de los fotones. Estos tres mecanismos son:

- Efecto Fotoeléctrico.

Este fenómeno ocurre cuando la energía de los fotones es menor que 0.1 MeV. En este caso toda la energía del fotón es transferida a un electrón del medio, arrancando éste de su órbita y confiriéndole una energía cinética igual a:

$$E_e = E_\gamma - E_u.$$

- Efecto Compton.

En este caso el fotón incidente cede solo parte de su energía a un electrón orbital, arrancándolo y transfiriéndole cierta energía cinética. El fotón, con menos energía, prosigue su trayectoria, formando un ángulo con su dirección original.

$$E'_\gamma = E_\gamma - (E_e + E_u)$$

donde

E_{γ} = energía del fotón resultante

E_y = energía del fotón original

E_e = energía cinética del electrón

E_u = energía de unión del electrón

- Formación de pares.

$$E_{\gamma} = 2m_e - E_e^- + E_e^+,$$

donde

E_{γ} = energía del fotón

m_e = masa del electrón

E_e^- = energía cinética del negatrón

E_e^+ = energía cinética del positrón

Evidentemente, la radiación

electromagnética, al no poseer masa ni

carga, tiene muy

donde

E = energía del fotón

m = masa del electrón

E = energía cinética del negatrón

E = energía cinética del positrón

Evidentemente, la radiación electromagnética, al no poseer masa ni carga, tiene muy poca probabilidad de interaccionar dentro de la materia, por lo que debe recorrer caminos más largos para consumir toda su energía. Debido a esto, su ionización específica es mucho menor que la de las partículas α y β , por tanto, su alcance es mucho mayor. Por esta razón, para frenar los fotones de los radioisótopos de uso frecuente es necesario utilizar varios centímetros de plomo.

2.2. EFFECTOS BIOLOGICOS

Personas que se encuentran frecuentemente sometidas a los Rayos X o a radiaciones considerables, no son capaces de detectar, ya que las alteraciones somáticas que la radiación puede producir, no produce dolor y por ende los sentidos son incapaces de captar la injuria, como esta radiación nuclear es radiación ionizante, se debe tener cuidado en su manejo. Por la cantidad de tipos de radiación se ha realizado una escala,

dependiendo de su longitud de onda que va
desde 10^{-10} a 10^{-6} .

De 10^{-10} a 10^{-6} se encuentran el grupo de las radiaciones ionizantes, son las que producen iones al contacto con materiales, ya que se desprenden los electrones orbitarios, produciendo una inestabilidad en el átomo que se traduce en una producción de iones.

Las radiaciones no ionizantes las encontramos en el resto de la escala, como son los rayos X, rayos gamma, rayos alpha y rayos beta.

no

Los alfa y beta no tienen masa, carga y son pequeños corpúsculos. Los rayos alpha tiene partículas más grandes que los beta, estos son los rayos que se utilizan en la medicina nuclear.

Los rayos x y rayos gamma no tienen masa ni carga, son utilizados en radiología.

Medición de los rayos

Se hace en unidades de medida y son:

RAD, REM, ROENTHGEN.

Rad: Dosis absorbida de radiación que equivale a cualquier radiación ionizante.

Rem: Es el equivalente biológico a rayos $x = \text{Rad}$.

Roentghen: Unidad equivalente a ionización, mide la dosis de exposición pero referente al aire.

Dosis permisible en Rayos X: 100 mill
rad/semana - 400 mill rad / mes - 5
rad / año.

III. RADIOFARMACIA

Los radiofármacos, a saber, los radionúclidos primarios y los compuestos marcados, son sustancias que unen a sus características químicas estructurales propias la cualidad de emitir radiaciones y ser aptos para emplearse en biología animal o humana con fines de investigación, diagnóstico y tratamiento. Los radionúclidos primarios son generalmente compuestos inorgánicos del elemento respectivo en solución, como, por ejemplo, yoduro de sodio radiactivo ($^{131}\text{I Na}$). Los compuestos marcados son el resultado de un proceso que incorpora o une un radionúclido primario y una molécula, elegidos conforme a la finalidad que se persigue (por ejemplo, DTPA $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (dietilentetraminapentacético)).

Los radionúclidos primarios pueden producirse en reactores nucleares (exclusivamente por reacción n y γ) o en aceleradores de partículas, fundamentalmente el ciclotrón.

La producción de compuestos marcados se realiza mediante procesos diversos: a) el intercambio isotópico, en el cual un átomo estable de la molécula (1) es reemplazado por un átomo radiactivo de la misma identidad (p.ej., el

ortoyodohipurato de sodio ¹³¹I); b) por incorporación del radionúclido en una sustancia que lo capta sin que éste se integre a su estructura original y sin que la altere en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (tal como la yodoalbúmina ¹³¹I, que se prepara a partir de la albúmina humana); y c) la fijación o coprecipitación del radionúclido con el compuesto (p.ej., hidróxido de estaño ^{99m}Tc) coprecipitado con el ^{99m}Tc).

La expresión radiofármacos resulta impropia cuando se emplea para aplicaciones diagnósticas porque el vocablo significa droga o medicina, lo que obviamente no es el caso. Si cabe en el orden de las aplicaciones terapéuticas, pero en el otro caso sería más propio reemplazarla por agentes para radiodiagnósticos (2). No obstante, la expresión radiofármacos está generalizada y arraigada, por lo que nos allanamos a su sentido convencional. Queda por mencionar la expresión sustancia trazadora radiactiva o trazador radiactivo, introducida por Georg von Hevesy, también muy generalizada, que en la jerga nuclear corriente equivale a radiofármaco.

Las aplicaciones de los radiofármacos, en cuanto se refiere a la investigación y al diagnóstico clínicos, comprenden distintas modalidades (3):

- Las investigaciones de procesos metabólicos, que incluyen la determinación de la composición del cuerpo y su estado funcional, como son el total de agua, el volumen del fluido extracelular, el sodio y potasio intercambiables, etc.
- Técnicas centellográficas que permiten visualizar órganos o sistemas diversos en sus aspectos morfológicos, estructurales y funcionales (los radiofármacos susceptibles de utilizarse a este fin son los agentes productores de imágenes).
- Estudio dinámico de los fluidos: sangre, orina, líquido cefalorraquídeo, etc., y
- Procedimientos que conjugan técnicas inmunológicas y bioquímicas con los radiofármacos, posibilitando la evaluación de sustancias diversas: hormonas, vitaminas, virus, drogas existentes en la sangre u otros fluidos en concentraciones infinitamente pequeñas (nanogramo, picogramo), primordialmente el radioinmunoensayo.

Las tres primeras aplicaciones se practican en parte o totalmente "in vivo" y la última totalmente "in vitro", siempre en función de la radiación gamma. Tienen por

finalidad o la evaluación de la radiactividad, como en el caso de la curva de la captación tiroidea, que es un parámetro funcional, o la creación de una imagen, como en el caso de la centellografía o gammagrafía.

Otro orden de aplicaciones médicas tiene una finalidad terapéutica, en función de las radiaciones beta. En este sentido, el ¹³¹I ocupa un lugar relevante para el tratamiento del hipertiroidismo y del cáncer tiroideo, en tanto el ³²P, mantiene vigencia para el tratamiento de la policitemia vera. Actualmente, con menos posibilidades, se emplea también el oro radiactivo, ¹⁹⁸Au.

Las formas físicas de administración de los radiofármacos son varias, siendo las más empleadas:

- Al estado de gas; por ejemplo, el xenón (¹³³Xe) y el criptón (⁸⁵Kr);
- esos mismos en solución.
- Soluciones de radiofármacos como el yoduro de sodio (¹³¹I Na), DTPA ^{113m}In, fitato de sodio ^{99m}Tc, etc.
- Soluciones coloidales; por ejemplo, oro coloidal ¹⁹⁸Au, sulfuro de tecnecio (^{99m}Tc) etc.

- Suspensiones de partículas de tamaño entre 0.5 u y 1 u, denominadas microagregados (por ejemplo, ^{113m}In);
- Suspensiones de partículas de 30 a 80 u, denominadas macroagregados (por ejemplo, macroagregados de ^{99m}Tc). albúmina ^{99m}Tc).
- Microesferas, es decir, agregados de conformación esférica suspendidos en solución salina de distintos tamaños: milimicroesferas y microesferas, (por ejemplo, milimicroesferas de albúmina ^{99m}Tc y microesferas de albúmina ^{99m}Tc).

Obviamente, todas las formas de partículas son portadoras de un radionuclido.

Mencionamos simplemente las fuentes selladas de ²²⁶Ra, ⁶⁰Co, ⁹⁰Y, ¹⁹⁸Au y ⁵¹Cr en forma de tubos, agujas, semillas, perlas o alambres; macrocoloides, en forma de aglutinados insolubles, con polivinilpirrolidona (PVP), y micropartículas coloidales de fósforo (³²P), con fines terapéuticos.

Todo radiofármaco que de un modo u otro se inyecta en el organismo debe ser estéril y apirógeno, requisito innecesario

cuando se emplea por inhalación o vía oral.

El comportamiento en el organismo de los compuestos marcados y de las formas de partículas no depende en absoluto del radionúclido marcador, sino de las características del "carrier". Los compuestos marcados se comportan en función del metabolismo de su estructura química y las partículas lo hacen en función de sus cualidades físicas, esencialmente el tamaño. Así, el ortoyodohipurato de sodio ¹³¹I es captado selectivamente y eliminado por vía renal, mientras el rosa de Bengala ¹³¹I sigue el curso hepatobiliar de la bilirrubina. En cambio, las formas coloidales y los microagregados, tras inyección i.v., son fijados por el sistema reticuloendotelial; hígado, bazo, médula ósea; y los macroagregados quedan en el pulmón, en tanto las microesferas se utilizan para estudios de perfusión sanguínea (p.ej., circulación coronaria). En todos los casos, las partículas se detienen en el órgano de interés, permitiendo la realización de la imagen buscada; posteriormente, la envoltura proteica se metaboliza y el radionúclido es eliminado.

La administración de los radiofármacos puede hacerse por la vía oral, intravenosa, (i.v.), intrarterial, intramuscular (i.m.) intratecal, inhalatoria, intersticial (para ganglios linfáticos), intraperitoneal e intraarticular.

En síntesis, la administración de los agentes radiactivos, o radiofármacos, se realiza de dos formas: como radionúclido simple (ejemplos: yoduro de sodio ($^{131}\text{I}\text{Na}$), fluoruro de sodio ($^{18}\text{F}\text{Na}$), cloruro de hierro ($\text{Cl } ^{59}\text{Fe}$)), dotado de alto grado de localización específica tisular para el órgano de interés; o bien, como compuestos, sea en forma de moléculas o en forma de partículas marcadas, susceptibles de revelarnos su trayectoria hasta que alcanzan su destino.

El yodo ^{131}I es un emisor beta y gamma con una energía promedio de 0.364 MeV. Fue uno de los primeros radionúclidos incorporados a la práctica de la medicina nuclear y el más utilizado hasta el comienzo de la década del 70. Esta difusión se impuso por las ventajas de sus características, entonces insuperadas: periodo de semidesintegración de duración suficiente (8 días) para dar tiempo a la preparación de los compuestos, a la realización de los controles y a la recepción en el lugar de destino (usuario); fácil de manipular; y de bajo costo. Las radiaciones beta lo hacen útil en terapia y las gamma para estudios de detección externa.

Actualmente, sigue siendo irremplazable en terapéutica para el tratamiento del hipertiroidismo y del cáncer de tiroides, pero su empleo a fines diagnósticos se ha visto reducido.

Esto se debe a que el tiempo requerido para la realización de los estudios, es por lo común, apreciablemente menor que su semiperíodo de desintegración, de modo que el paciente recibe radiaciones durante un período mayor que el necesario. Por esto, hoy en día, en general, se prefieren los radionúclidos de vida media corta. A este respecto es importante recalcar que el "desiderátum" es que el radionúclido a emplearse sea un emisor gamma puro monoenergético con una vida media suficientemente larga para permitir la realización del estudio y adecuadamente corta para evitar la radiación innecesaria del paciente.

El yodo 125 es un emisor gamma puro, con energía de 0.035 MeV y período de desintegración de 60 días. Su mayor uso reside en la marcación del antígeno o del anticuerpo para las técnicas de radioninmunoanálisis. El yodo 123 es también un emisor gamma puro, con energía de 0.159 MeV y período de semidesintegración de 13.2 horas; su producción se realiza en ciclotrones, lo que constituye un obstáculo a su generalización, pero posee grandes posibilidades futuras.

GENERADORES

Su concepción nació de la existencia de un radionúclido madre de período relativamente largo, susceptible de generar espontáneamente, de modo continuo, un radionúclido hijo de

período corto, apropiado, particularmente, para ser utilizado como agente productor de imágenes. Para su obtención se utiliza un dispositivo consistente en una pequeña columna de vidrio que contiene un material al cual adhiere el radionúclido madre (p.ej., el molibdeno ^{99}Mo), que tiene un período de semidesintegración de 67 horas y de cual deriva el radionúclido hijo, en este caso el tecnecio $^{99\text{m}}\text{Tc}$, cuyo período de semidesintegración es de 6 horas.

Para extraer éste se introduce por la abertura superior de la columna una solución fisiológica y se recoge a la salida, en la cual contiene el radionúclido hijo. Después de esa extracción, la actividad del hijo dentro del dispositivo se reduce, pero seguidamente comienza a regenerarse para llegar nuevamente al equilibrio con la madre. Para este generador el equilibrio $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ se alcanza a las 1623 horas, y éste es el momento óptimo para una nueva elución, si bien puede hacerse en un intervalo menor, pero entonces con menor rendimiento. Tras la nueva elución se repiten los ciclos, pero la actividad del generador va declinando progresivamente.

La extracción sigue el control fisicoquímico, biológico y radioisotópico con la medición de la radiactividad del producto, en este caso el pertecnetato de sodio $^{99\text{m}}\text{TcO Na}$, que podrá ser utilizado como tal o integrando

diversos compuestos marcados. Tal es, a grandes rasgos, el generador más difundido de tecnecio 99m .

Otro generador es el $^{113}\text{Sn}/^{113}\text{In}$. La madre es el estaño 113 , con periodo de semidesintegración de 118 días; el hijo es el indio 113m , con periodo de semidesintegración de 1.7 horas. Tiene sobre el anterior la ventaja de la más larga vida física de la madre, pero desventajas por las características físicas del indio 113m a las que se refiere más adelante.

Cabe mencionar, además, el generador germanio 68 /galio 68 ($^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$), emisor de positrones, y el generador itrio- $^{87}\text{Y}/^{87}\text{Sr}$ ($^{87}\text{Y}/^{87}\text{Sr}$).

De los generadores mencionados, los dos primeros aportan el 99 por ciento del consumo, con gran prevalencia del tecnecio- 99m . Este es el mejor y más versátil, pero como su vida útil se limita a una semana, resulta muy costoso y solo amortizable en centros de mucha actividad. Queda para el generador de indio 113m la ventaja de la vida larga de la madre, de modo que con dos unidades se pueden subvenir las necesidades durante casi un año en lugares donde hay menor movimiento de pacientes, por lo que resulta particularmente adecuado para laboratorios en zonas aisladas.

JUEGOS DE REACTIVOS ("KITS")

El producto obtenido del generador puede ser utilizado en su forma natural de extracción (ejemplos: el pertecnetato de sodio, el tricloruro de indio (^{311}Cl ^{113}In)), siendo aditamento, o bien, como parte integrante de un compuesto marcado. En este último caso, el producto obtenido del generador se agrega a los juegos de reactivos o "kits", cuya expresión más simple es el "Unikit". A éste se le añade directamente el eluido del generador, controlándolo y sin otras operaciones, se inyecta la cantidad que se propone de la mezcla resultante. Vienen prefabricados por el comercio, pero pueden fabricarse "in situ" según fórmulas que varían de acuerdo con la finalidad de su empleo.

Radionúclidos de vida media corta

La incorporación de radionúclidos con un período de semidesintegración de pocas horas se ha impuesto decididamente. El hecho significa un progreso notable en virtud de la menor dosis de radiación que con ellos recibe el paciente. Debido a la relativa inocuidad de estos radionúclidos, se puede administrar dosis más altas, hasta de 10 ó 20 mCi, con lo cual se obtienen imágenes de mejor definición. Otra ventaja consiste en la posibilidad de obtención "in situ" para su uso inmediato. Como complemento,

la introducción de los juegos de reactivos tipo "Unikit" facilitó la preparación de compuestos marcados y amplió el ámbito geográfico susceptible de beneficiarse de estas adquisiciones, haciéndolas accesibles en lugares distantes de los centros desarrollados.

El tecnecio^{99m} es actualmente, por mucho, el radionúclido más empleado. Con sus variadas aplicaciones en el marco del diagnóstico radioisotópico, ha desplazado en este sentido al

I de la prevalencia que mantuvo hasta hace pocos años.
131

Las razones del cambio residen especialmente en que el ^{99m}Tc es un emisor gamma monoenergético de más baja energía (0.140 MeV), con una vida media física corta (6 horas) suficiente, sin ser excesiva, para el tiempo de realización de los estudios clínicos, todo lo cual satisface las características físicas requeridas para la producción de una imagen definida, con el mínimo de radiación del paciente, e igual eficiencia en el centellógrafo lineal y en la cámara de centelleo. En su forma de pertecnetato de sodio se comporta en el organismo de manera similar al yoduro de sodio. Por ello, previamente a su administración al paciente, éste debe recibir perclorato de potasio en dosis de 400 mg a 1g por 70 kg de peso corporal, con lo cual se bloquean las glándulas salivales y los plexos coroideos, obteniéndose así mejor imagen. En distintas formas químicas, se aplica para la centellografía de cerebro, riñones, hígado y vesícula biliar,

pulmones, esqueleto, tiroides, bazo, médula ósea, divertículo de Meckel, "pool" sanguíneo, glándulas salivales (en este caso, obviamente sin administración previa de perclorato), etc.

El pertecnetato puede obtenerse partiendo de generadores (8); por extracción del molibdato de sodio (^{99}Mo) con metilacetona (9,10); por sublimación de sus óxidos (10); y por irradiación de ^{100}Mo en un ciclotrón (11). En Latinoamérica, al igual que en los Estados Unidos, se utilizan los dos primeros métodos.

El indio $^{113\text{m}}$, emisor gamma monoenergético de 0.393 MeV, reúne "a priori", características casi ideales. Su desventaja frente al tecnecio $^{99\text{m}}$ reside en la mayor dosis de radiación al paciente y su menor eficiencia en la cámara de centelleo. INyectado por la vía i.v. tal como se extrae del generador (^{113}In), se fija rápidamente a la transferina del plasma. Es particularmente apropiado para la centellografía del cerebro, del "pool" sanguíneo, del sistema reticuloendotelial, del pulmón y del esqueleto. Los métodos de obtención son" del generador y por extracción de solventes.

La lista de radiofármacos del indio 113 incluye al $^{113\text{m}}\text{In}$ EDTMP (etilendiaminotetrametilénfosfórico), ya usado en

humanos en Latinoamérica.

El galio⁶⁸, emisor de positrones, con semiperíodo de 68 minutos, se utiliza tal como se extrae del generador (EDTA Ga) para estudios de orientación en el diagnóstico de tumores, particularmente linfomas, procesos inflamatorios y abscesos.

El estroncio⁸⁷, emisor gamma, con período de semidesintegración de 2.8 horas, se utiliza de preferencia al Sr para imágenes del esqueleto. Se extrae del generador (Y) con ácido cítrico diluido.

Otros radiofármacos utilizados con menor frecuencia son el Seseleniometionina (páncreas), el Au coloidal (hígado, bazo), Hg neohidrina, Hg neohidrina (riñones), Y DTPA (cerebro), Xe (pulmones), etc.

Entre los radionúclidos obtenidos del ciclotrón actualmente aplicables al diagnóstico en medicina nuclear, cabe citar el talio (Tl), emisor gamma con energía de 0.08 MeV y semiperíodo de 74 horas, útil para el diagnóstico de infarto de miocardio, el citrato de galio (Ga) y el In DTPA para tumores; el yoduro de sodio (I¹³¹Na) para tiroides, el óxido de carbono (C¹⁴Ca) para placenta, etc.

Por último, cabe agregar que, recientemente, S Treves ha introducido un generador de ^{191}Os (osmiato de potasio), cuyo semiperíodo de 4.5 seg (0.065 y 0.199 MeV), particularmente apropiado para los estudios dinámicos cardiovasculares en pediatría, siendo su poder de irradiación 200 veces menor que el del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (comunicación personal).

IV. INSTRUMENTACION

Las cámaras de ionización son particularmente útiles para la cuenta de las partículas B y aún para las alfa, el computador las detecta y da una lectura, la cual el médico interpreta y da su diagnóstico.

4.1. CONTADOR DE POZO

Consta de un cristal de centello previsto de un orificio a lo largo del eje del cilindro que permite introducir "viales" con muestras radiactivas y medirlas en una geometría casi envolvente, con lo cual aumenta el rendimiento de la medición.

4.2. CONTADOR DE CUERPO TOTAL

Algunas veces es necesario hacer un barrido total del cuerpo para localizar metástasis funcionantes para determinar el perfil de distribución de cierto elemento. Para estos casos se utiliza un contador de cuerpo total, que consiste en un cristal de centello de gran tamaño (20 cm de diámetro por 10 cm de

altura), el cual transmite la información a tres fotomultiplicadores.

Según el caso, el cristal puede usarse con o sin colimadores, de acuerdo con el radioisótopo utilizado y la zona a localizar. La información enviada por el cristal a través de los fotomultiplicadores se registra mediante un espectómetro que puede discriminar diferentes energías con lo cual se puede hacer una localización usando simultáneamente varios isótopos de distinta energía, si es necesario.

4.3. CENTELLOGRAFO DE DETECTOR MOVIL O LINEAL

Consta de un cabezal adosado a un sistema mecánico mediante el cual se puede rastrear automáticamente sobre el área corporal de interés e ir registrando en cada punto la actividad, obteniendo imágenes que reproducen la distribución topográfica del radioisótopo. El equipo así constituido es el centellógrafo de detector móvil o lineal, cuya finalidad principal es la obtención de imágenes estáticas que informan sobre la morfología, la estructura y la función de órganos o sistemas.

4.4. CAMARA GAMMA O CAMARA DE CENTELLEO

Es actualmente uno de los equipos más sofisticados de la medicina nuclear para la reproducción de imágenes. Está constituido por un gran cristal de yoduro de sodio activado con talio, de 30 a 40 centímetros de diámetro y 12 milímetros de espesor. Treinta y siete fotomultiplicadores están adosados al cristal y son los encargados de registrar la posición y la energía de cada una de las señales que le llegan. El cabezal está blindado con aproximadamente 4 centímetros de plomo, y frente al cristal, un dispositivo "ad hoc" posibilita colocar el colimador adecuado a cada estudio. La información enviada por los fotomultiplicadores es procesada en la consola de comando, visualizada en una pantalla de rayos catódicos y registrada en película fotográfica o radiográfica. Además, como opción, se puede conectar un grabador de cinta magnética en el cual se acumula toda la información ofrecida por la cámara y eventualmente, comentarios dictados verbalmente, tales como datos clínicos del paciente en estudio, electrocardiogramas, etc., información que puede ser revista en cualquier momento. También puede ser conectada a una computadora para procesar toda la información obtenida.

Así mismo, con un dispositivo adecuado, puede efectuarse un rastreo total del cuerpo por sectores que luego se integran para dar la imagen total. Los modelos de cámaras más recientes posibilitan la obtención de la imagen del cuerpo total, abarcada en una placa radiográfica. Esta imagen total supera a la técnica del rastreo con detector móvil.

Entre el centellografo lineal y la cámara gamma existen diferencias que importa mencionar. Con el centellografo lineal la inscripción de la imagen, condicionada a la duración del rastreo, demanda cierto tiempo (en promedio, alrededor de media hora) y la imagen reproduce el órgano o sistema en estudio al tamaño natural. Con la cámara, la imagen es de tamaño reducido, pero su ejecución en tiempos de segundos permite realizar, con registros seriados, estudios dinámicos y también, con mayor tiempo de exposición, una imagen estática. Definitivamente, todos los logros del centellografo lineal pueden obtenerse también con la cámara gamma. Esta ofrece también la ventaja de estudios dinámicos, lo cual le confiere una neta superioridad; pero la gran diferencia de costo de los equipos explica la más fácil accesibilidad del centellografo lineal, que sigue siendo un arma muy

eficaz de la medicina nuclear para un sinnúmero de
diagnosticos.

V. APLICACIONES CLINICAS

5.1. CENTELLOGRAFIA DE TUMORES Y PROCESOS INFLAMATORIOS

El hallazgo de un trazados específicamente oncofílico constituye actualmente la conquista más ansiada de la radiofarmacología. Lamentablemente, los múltiples ensayos realizados a tal fin no han satisfecho el propósito buscado. Sin embargo, cabe reconocer que el ^{67}Ga , aunque esté lejos del "desiderátum", realiza una aproximación en tal sentido por su orientación predilecta hacia los linfomas, los procesos inflamatorios y, en menor escala, otros procesos.

El ^{67}Ga es producto del ciclotrón, emisor gamma puro, con período de semidesintegración de 78 horas. Se administra en forma de citrato por la vía i.v. en dosis de 210mCi. Su eliminación se realiza por vía urinaria durante las primeras 24 horas (1525%) y después por la vía intestinal (10%), quedando el resto en el organismo durante unas semanas. Las imágenes pueden registrarse, indistintamente, con el centellografo lineal o con la cámara de centelleo.

Por el carácter sistémico y las localizaciones diseminadas de algunos procesos, la centellografía de cuerpo entero es la de elección. Previo a la obtención de la imagen se aconseja evacuar el intestino del paciente para evitar las imágenes positivas falsas que pueden resultar de la excreción intestinal.

El momento de realizar la centellografía depende del diagnóstico presuntivo. Para la investigación de tumores, la apropiada es a las 48/72 horas postinyección, repitiéndolas finalmente a las 96/120 horas. En cambio, cuando se busca localizar procesos inflamatorios, es preferible realizar el estudio a las 4/24 horas porque el proceso de fijación del trazador es más rápido en estos casos.

El mecanismo de fijación del galio no ha sido totalmente resuelto aún. Llegado a la sangre, se liga de preferencia a la transferrina, débilmente. En los procesos inflamatorios, la transferrina se fija en la superficie de los leucocitos, neutrófilos y de las bacterias, en tanto el galio iónico puede penetrar en las células, fijándose en la lactoferrina con mayor fuerza que a la transferrina. Lo dicho explica la imagen positiva de los procesos inflamatorios,

incluyendo los abscesos en los cuales prevalecen los leucocitos. En el caso de los tumores, se sabe que la localización del galio tiene lugar en los lisosomas o en gránulos similares a los lisosomas.

El centellógrama normal con galio, a las 72 horas de inyectado, visualiza mayormente el hígado y el esqueleto, sobre todo la columna, el esternón, la pelvis y la nasofaringe; ocasionalmente, se visualizan las glándulas lacrimales, las salivares, las mamas (que durante el postparto y en las mujeres que lactan, suelen mostrar fijación acentuada), los órganos genitales, el bazo y las áreas de crecimiento óseo.

Los procesos inflamatorios son, en general, de las alteraciones que más favorecen la fijación del galio. Cuando se sospecha la presencia de éstos, reiteramos que el registro debe hacerse precozmente, a las 46 horas postinyección. Si el resultado es negativo, está indicado repetir el registro 24 horas, dado que a veces éste puede destacar imágenes no aparentes en el anterior. En el marco de la patología inflamatoria, la identificación de los abscesos constituye uno de los aportes más significativos de la centellografía con galio, la cual es una prueba de alta sensibilidad pero

de escasa especificidad.

Entre los distintos procesos inflamatorios susceptibles a ser evidenciados por el galio, aquellos que se localizan en la cavidad abdominal son los más beneficiados por esta técnica diagnóstica.

Cualquier colección purulenta, donde quiera que se ubique, son susceptibles de visualización con galio. Una aplicación de particular interés es en los estados febriles de causa desconocida, en los cuales el descubrimiento de una imagen caliente revela la localización del proceso y orienta al tratamiento.

La otra aplicación del citrato de galio de interés práctico concierne a un grupo nosológico cuya histopatología es llamativamente heterogénea: linfomas, cáncer broncogénico, hepatoma y tumores de testículo.

Entre los linfomas, la enfermedad de Hodgkin ofrece un alto porcentaje de positividad, particularmente en su localización mediastial, esplénica y en los ganglios superficiales; les sigue en orden decreciente los histiocíticos y, en proporción menor, los linfocíticos.

Obviamente, la imagen centellográfica no hace el diagnóstico etiológico que en última instancia requiere el estudio histopatológico; pero es singularmente informativa para ilustrar la distribución y la extensión del proceso, y para seguimiento de control del tratamiento. Sirve, además para la punción biopsia y en la práctica de la terapia radiante.

En síntesis, merece recalcar: que no existe un trazador oncofílico específico; que la centellografía con ^{67}Ga puede aportar informaciones de interés clínico a los fines del tratamiento, particularmente en los procesos inflamatorios y en los linfomas; y que para el diagnóstico diferencial entre estas dos patologías, ante una centellografía positiva, cuenta en favor de inflamación si el registro no ha sido precoz y sugiere un proceso tumoral si la imagen aparece después de las 24 horas de la inyección.

5.2. EXPLORACION DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL CON RADIOISOTOPOS

El método radiosotópicos de la exploración del sistema nervioso central constituye uno de los principales de

la medicina nuclear a la clínica. El diagnóstico de ciertos procesos neurológicos se ha visto facilitado por la aparición de algunos procedimientos que se basan en la íntima relación existente entre el parénquima nervioso y sus dos sistemas circulatorios: el sanguíneo y el líquido cefalorraquídeo. Estos procedimientos configuran cuatro modalidades que difieren en función de su finalidad:

- Las técnicas centellográficas que procuran evidenciar lesiones neurológicas focales, contando con las alteraciones que la lesión localizada provoca en la circulación sanguínea y/o en la barrera hematoencefálica.
- Las técnicas centellográficas que evidencian las alteraciones existentes en la circulación del líquido cefalorraquídeo.
- Las técnicas que proponen medir el flujo sanguíneo cerebral.
- Las técnicas actualmente en desarrollo que proponen reconocer las alteraciones del metabolismo celular, mediante sustancias marcadas imprescindibles para la vida celular

o fármacos que tienen una acción selectiva a nivel de las células nerviosas.

La centellografía encefálica comprende dos procedimientos; en rigor, dos tiempos de un estudio, cada uno de los cuales aporta una información propia.

El primer tiempo del estudio consiste en la obtención de imágenes seriadas que se realizan en intervalos de 1 a 3 segundos tras la inyección de un bolo de radiofármaco en una vena periférica superficial. La serie configura un estudio dinámico que registra el primer pasaje de la sustancia radiactiva a través de los vasos principales del encéfalo, en el que cabe distinguir un tiempo arterial, un tiempo arteriocapilar y un tiempo venoso. Ha sido denominado angiografía cerebral radioisotópica (ACR) por analogía con la angiografía radiológica contrastada, ya que la índole de información que ambas procuran es semejante pero no equivalente, dado que las imágenes radioisotópicas tienen menor definición.

Con el estudio dinámico puede evidenciarse el grado de vascularidad de una lesión focal y/o las alteraciones que el proceso localizado provoca en los vasos principales adyacentes. Este estudio está indicado

cuando se sospecha la existencia de una lesión vascular, y en la práctica, ésta es su mayor contribución al diagnóstico. Obviamente, para realizar los estudios dinámicos se requiere la cámara gamma.

La segunda parte del estudio completo consiste en la obtención de imágenes estáticas registradas en proyecciones diferentes. De este modo, una lesión se evidencia por una imagen resultante del radiofármaco que contrasta con la escasa densidad radiactiva del parénquima normal circundante. En muy pocas circunstancias, una lesión puede traducirse a la inversa, por un déficit de concentración de la radiactividad.

El registro centellográfico de las imágenes se realiza inmediatamente después de la administración del radiofármaco y se repite entre 2 y 6 horas después (estudio precoz y estudio tardío, respectivamente). La realización de centellografías obtenidas con intervalo permite comparar la concentración de ambas imágenes con función del tiempo e inferir conclusiones sobre la naturaleza de la lesión. Además, es posible que en el registro tardío se descubra una lesión no aparente en el registro precoz.

El cotejo de las informaciones que aportan las imágenes dinámicas y las estáticas ha aumentado la sensibilidad y la especificidad de la centellografía encefálica.

La centellografía encefálica es un procedimiento inocuo, de realización ambulatoria, que para el paciente significa solo una punción venosa que se realiza comúnmente en una de las venas del pliegue del codo. La sustancia inyectada no provoca cambio significativo en el organismo. La dosis de radiación es baja e insuficiente para causar alteración biológica. El procedimiento puede considerarse incluido entre los métodos de diagnóstico no agresivos, o, con criterio riguroso, muy próximo a ellos.

La Centellografía está indicada principalmente:

- Cuadro neurológico que configura una lesión localizada : masas ocupantes, tumores primitivos o secundarios.
- Hipertensión endocraneana, con o sin sintomatología focal asociada.

- Cáncer pulmonar broncogénico y de mama: pesquisa de metástasis latentes.
- Control de la evolución postoperatoria de tumores encefálicos (investigación de recidivas o aparición de nuevas lesiones).
- Control evolutivo de terapias radiantes o con citostáticos.
- Accidentes vasculares encefálicos: diagnósticos de verificación y diagnóstico diferencial entre infarto y mal formación arterial.
- Hematomas y abscesos intracerebrales.
- Traumatismos: Detección de hematomas.

MIELO-CISTERNO-VENTRICULO-CENTELLOGRAFIA

El interés por el estudio radioisotópico del sistema del líquido cefalorraquídeo (LCR) reside, principalmente, en el aporte de informaciones de carácter funcional. También evidencia aspectos

morfológicos del sistema, aunque con menor eficiencia que los métodos neurológicos convencionales y, en especial la tomografía axial computada. (TAC).

Los radiofármacos, una vez inyectados en el comportamiento respectivo, quedan suspendidos en el LCR y son arrastrados por la circulación de éste.

Entonces, realizando imágenes seriadas o mediciones externas de niveles de radioactividad, se obtiene una información esencialmente dinámica del sistema. A los fines de este estudio se han desarrollado cuatro técnicas:

- La mielocentellografía, que explora la permeabilidad del espacio subaracnoideo espinal, indicada principalmente en los síndromes de compresión medular.
- La cisternocentellografía, que explora la circulación intracraneana del LCR y las condiciones del sistema ventricular y del espacio subaracnoideo intracraneano, indicada principalmente en la hidrocefalia y en las fistulas del LCR.

- La ventriculocentellografía que explora las condiciones del sistema ventricular y la circulación del LCR.
- Los procedimientos de control de las derivaciones neuroquirúrgicas del LCR. Su finalidad principal es la evaluación del funcionamiento de las derivaciones extracraneales.

La mielocentellografía, está indicada principalmente para:

- Síndrome de compresión medular.
- Hernias cervicales, lumbares y sacras.
- Metástasis vertebrales.
- Afecciones óseas extradurales: reticulosarcomas, linfosarcomas, enfermedad de Hodgkin, enfermedad de Pott, epiduritis, crónica nodular.
- Procesos extramedulares: Meningiomas cervical y torácico, neurinomas,

malformaciones arteriovenosas.

- Procesos intramedulares: Siringomielia,
neuroblastomas.

5.3. APLICACION EN LA TIROIDES

La glándula tiroidea es uno de los órganos más explorados y mejor conocidos en cuanto a sus funciones y diagnóstico. Este privilegio se debe en gran parte a la feliz coincidencia del papel trascendente que ella representa en el metabolismo del yodo y al hecho de que el yodo radiactivo, obtenido artificialmente desde hace más de cuatro décadas, fue uno de los primeros núclidos susceptibles de utilización biológica. Esta conquista tuvo por natural consecuencia el empleo del radioyodo en infinidad de investigaciones sobre la glándula. Por añadidura, aplicando nociones de fisiopatología que configuran una situación única en la economía humana, se lograron resultados espectaculares en el tratamiento del hipertiroidismo y del cáncer tiroideo mediante el radioyodo.

Fisiología, Biosíntesis, fisiopatología y Pruebas funcionales.

La tiroides toma de la sangre el halógeno yodo, lo incorpora a una molécula orgánica, así lo acumula en su seno, y después, respondiendo a estímulos específicos, libera a la circulación hormonas tiroideas que llevan el yodo como parte integrante de su estructura molecular. Este complejo proceso, que acaba en la intimidad de los tejidos, es susceptible de ser seguido paso a paso mediante distintos isótopos del radioyodo.

El yodo ingresa en el organismo por la vía digestiva con los alimentos, es absorbido en el intestino delgado y pasa a la circulación como yoduro, ingresando rápidamente en el espacio extraintracelular. La concentración del yoduro plasmático varía, en relación con el equilibrio yódico del medio ambiente, entre 0.5 y 8 $\mu\text{g/l}$ y el espacio de distribución de yoduro es alrededor del 30% del peso corporal, incluyendo en él las glándulas salivales, las estomacales y otros tejidos que también concentran el halógeno, pero sin metabolizarlo. El yodo circulante es eliminado por el riñón, que depura el yodo contenido en alrededor de 35 ml de plasma por

minuto, o bien, es incorporado activamente a la tiroides.

La tiroides extrae el yoduro del plasma por un mecanismo activo de transporte a través de la membrana celular (bomba de yoduro) y lo concentra en proporciones varias veces superiores a la del plasma. La depuración tiroidea de yoduros varia según el contenido plasmático del halógeno; para una concentración de alrededor de 2 ug/l esta depuración es de 16ml/min. Seguidamente, el yoduro es oxidado por una peroxidasa e incorporado a la molécula de tiroglobulina, de alto peso molecular, que contiene en su estructura secuencial grupos tirosilos a los que incorpora el yodo. Se forma así, en una primera etapa, monoyodotirosina (MIT), y después, por la agregación de un segundo átomo, diyodotirosina (DIT). Estas tirosinas se acoplan dentro de la molécula de tiroglobulina y forma la tetrayodotironina (tiroxina o T4) y la triyodotironina (T3). El contenido de yodo en tiroides depende del aporte diario con la dieta y se calcula entre 10 y 20 mg.

Normalmente, la tiroides extrae del plasma algo más de 100 ug/diarios de yodo y segrega cantidades equivalentes, sobre todo bajo la forma de T4 y T3.

Este proceso comienza con la hidrólisis de tiroglobulina, liberándose a la circulación, en especial, yodotironinas (T4 y T3) metabólicamente activas y yodotirosinas (MIT y DIT) metabólicamente inactivas, que son secretadas en parte a la circulación; las restantes pierden su yodo (deshalogenización), el cual, en forma de yoduro, reinicia el ciclo descrito. También pasan a la circulación pequeñas fracciones de tiroglobulina.

Las hormonas tiroideas de la sangre circulan bajo dos formas, entre las cuales existe un equilibrio; una pequeña fracción libre de T4 y T3, que es la metabólicamente activa, y el resto, la mayor parte, ligada a las proteínas plasmáticas que, por orden de importancia, son una globulina (TBG), la prealbúmina (TBPA) y la albúmina. La TBG es la que tiene mayor fuerza de unión, en especial para la tiroxina, siendo su capacidad de transporte de 20 a 25 ug/100ml de plasma. Los valores normales de tiroxina plasmática determinados por radioinmunoanálisis son entre 5 y 13 ug/100ml de suero, lo que equivale a 3.3. y 8.4 ug de yodo, respectivamente, y para la T3 entre 60 y 210 ng/100 ml, equivalente a entre 35 y 120 ng de yodo.

Las variaciones en más o menos de las proteínas

transportadas producen modificaciones en el mismo sentido de T4 y T3. Así, el aumento de los estrógenos, ya sea fisiológico (embarazo) o medicamentoso, eleva las cifras de las hormonas tiroideas circulantes, pero sus fracciones libres no se modifican significativamente. La disminución de las proteínas transportadoras (ausencia congénita, nefrosis, andrógenos) produce el efecto inverso.

Cuando las hormonas tiroideas llegan a la intimidad de los tejidos, una parte importante de T4 se degrada a 3-5, 3'-triyodotironina (T3 metabólicamente inactiva. Posteriormente, las tres sufren un proceso de deshalogenización y el yoduro producido reinicia el ciclo ya descrito (17, 18). Parece ser que los tejidos periféricos en cierta forma controlan la transformación de T4 en T3 o en T3R. Así, con la edad disminuyen los valores séricos de T3 (y en menor proporción, los de T4) y aumentan los de T3R. Lo mismo ocurre durante el reposo prolongado y ciertas afecciones crónicas.

No se conoce con precisión el proceso metabólico a nivel celular ni el modo de acción de las hormonas tiroideas, pero se ha avanzado mucho en el conocimiento del mecanismo de regulación de la

secreción de éstas a través del eje hipotálamo - hipófiso- tiroideo. Este proceso parece ser regido por la hormona liberadora de tirotrófina (TRH), que se elabora en el hipotálamo y estimula la producción hipofisiaria de la tirotrófina (TSH) y la salida de ésta a la circulación. La TSH, a su vez, estimula la incorporación del yodo a la tiroides, la síntesis hormonal, la hiperplasia glandular y la secreción de las hormonas tiroideas. Completa el sistema un mecanismo de retroalimentación, mantenido por las tasas circulares de T4 y T3 libres, que regula la secreción de las hormonas hipotálamo-hipofisiarias. Aparentemente, este mecanismo de retroalimentación responde con mayor sensibilidad a la T4 que a la T3.

El estudio de la función tiroidea puede realizarse mediante pruebas "in vivo" e "in vitro". A continuación, nos referimos a las más corrientes y haremos apenas mención de las utilizadas durante largos años y ya superadas. El empleo del radioyodo en los estudios "in vivo", una de las pruebas más utilizadas durante las décadas del cincuenta y sesenta, se basa en el conocimiento de que el yodo radiactivo recorre los mismos pasos metabólicos que el yodo estable (^{127}I), puesto que el organismo no tiene capacidad para discriminar las diferencias físicas

entre los dos. De este modo, valiéndonos de la condición radiante del yodo radiactivo, podemos detectar las distintas etapas metabólicas referidas. A tal efecto, la prueba más utilizada es la llamada curva de captación del radioyodo.

CAPTACION TIROIDEA DEL RADIOYODO

Esta prueba adquirió difusión con el empleo del ^{131}I (3,6,20); razones de dosis de radiación algo elevadas de este núclido han contribuido a su reemplazo por técnicas "in vitro". El ^{123}I , núclido de semiperíodo corto y que produce una dosis de radiación tiroidea cien veces menor, está difundiéndose rápidamente y, cuando se resuelvan algunos problemas técnicos, entre ellos el costo de producción y la eliminación de contaminación con el ^{124}I , pasará a ser el núclido de elección. El ^{131}I es un emisor gamma y beta cuyas características referidas permiten su fácil detección "in vivo", aún de concentraciones en la profundidad de los tejidos.

dosis de radiación

El radioyodo se administra generalmente por la vía oral, en ayunas, para facilitar su rápida absorción; la dosis varia, según la edad del paciente, entre 2 y 20 μCi . El yodo concentrado en tiroides se mide a

intervalos y sus valores conforman la curva de captación. A los fines prácticos, conviene realizar la primera prueba pocas horas después de la ingestión del yodo (1, 3 ó 6 horas), otra prueba intermedia a las 24 horas y una tercera a las 48 horas. En ciertas ocasiones, es útil otra medición posterior. Estas tres mediciones jalonan la curva de captación que, por las características de su perfil, configura generalmente una información de orientación.

Para evaluar el yodo concentrado en la tiroides se coloca frente al cuello del paciente un detector de centelleo adecuadamente colimado, en conexión con un escalímetro o integrador que registra la radiactividad acumulada en la glándula. Por distintos procedimientos se descarta la radiactividad extratiroidea representada por el radioyodo circulante en forma de yoduro o de hormonas tiroideas o la acumulación en glándulas salivares. Seguidamente, se coloca frente al detector un testigo que imita a la tiroides y al cuello del paciente, reproduciendo las condiciones geométricas de la medición; al testigo se ha incorporado una dosis radiactiva igual a la administrada al paciente. Un cálculo elemental, según la regla de tres simple, permite determinar el porcentaje del yodo acumulado en la tiroides.

La normalidad de los valores debe investigarse para cada laboratorio, pues ellos no dependen exclusivamente del estado normal o anormal de la función tiroidea, sino también el equilibrio de yodo con el medio ambiente (10,20). Así, en las personas eutiroides que habitan zonas de endemia con deficiencia de yodo se registran valores de captación relativamente altos. El caso contrario se da a causa de la ingestión de dietas ricas en yodo o de medicamentos que lo contienen, observándose valores bajos en eutiroides. Esto último ocurre también en pacientes a quienes se han realizado exámenes radiológicos que implican la administración de medios de contraste fuertemente yodados. Entonces, al ser aumentada la cantidad de yoduros en el espacio correspondiente, éstos compiten con el radioyodo, que tendrá menores posibilidades de ser incorporado a la tiroides; tras una colecistografía, pueden darse valores bajos de captación durante meses y en la mielo o en la histerosalpingografía, durante años.

APLICACIONES PRINCIPALES DE LA CENTELLOGRAFIA TIROIDEA

- Posición, forma y tamaño de la tiroides.

- Tiroides aberrante (tiroides lingual).
- Nódulos frios, nódulos tibios, nódulos calientes.
- Metástasis carcinomatosas.
- Evaluación del resto glandular post-tiroidectomía.

TRATAMIENTOS CON RADIOYODO (excluyendo el cáncer)

Indicaciones principales.

- Enfermedad de Graves-Basedow, a partir de los 25 años.
- Nódulos calientes (enfermedad de Plummer).

Contraindicaciones principales:

- Infancia y adolescencia.
- Gravidez y lactancia.
- Bocios grandes, mayores de 80 g.

- Bocios uni- o multinodulares con zonas centellográficamente frías.

Las alteraciones producidas en la glándula por acción

I administrado en dosis terapéuticas son semejantes
131

a las que provoca en general toda radiación sobre los tejidos vivos,; esto es, ionización manifestada por fenómenos celulares regresivos, con predilección por las células en hiperfunción, y , cuando elefecto es suficientemente intenso, el coloide se fragmenta y desaparece y los vasos sufren hialinización y necrosis. En resumen, podemos decir que el radioyodo realiza un tratamiento ionizante interno.

FORMA DE ADMINISTRACION Y PRECAUCIONES

El paciente en ayunas bebe la dosis adecuada de radioyodo diluida en un poco de agua común. Si existen vómitos o dificultad de deglutir, se administra la misma dosis en suero fisiológicoo por la vía i.v.. Dado que el yodo se elimina principalmente por orina o saliva, para evitar riesgos a terceros se instruye al paciente que evite contactos prolongados, sobre todo con niños, manteniéndolos a distancia; los cubiertos usados por el paciente deben lavarse por

separado, en abundante cantidad de agua, y estas precauciones deben mantenerse durante aproximadamente dos semanas.

La selección de pacientes a quienes conviene indicar el tratamiento con radioyodo ha sido muy debatida, y, si en lo principal se ha llegado a un acuerdo, en otros aspectos subsisten discrepancias y para estos casos nos remitimos a los resultados de nuestra propia experiencia.

La indicación más precisa para el empleo del radioyodo es: en pacientes mayores de 25 años de edad, en la enfermedad de Graves-Basedow y en el nódulo caliente. Por debajo de esa edad límite, podrá contemplarse su institución cuando estén contraindicadas las drogas antitiroideas (intolerancia, etc.) o cuando el paciente rehace la tiroidectomía. Recurrimos a la cirugía en pacientes con uno o más nódulos fríos e hipertiroidismo asociado.

Las contraindicaciones al radioyodo son:

- La infancia y la adolescencia - según la generalidad de los autores - en razón de la labilidad del organismo durante el

crecimiento y la eventual aparición, en el curso ulterior de la vida, de leucemia o cáncer imputables a las radiaciones; aunque este riesgo no ha sido confirmado, el criterio expuesto se mantiene;

- La gravidez y la lactancia.
- Los bocios mayores de 80 g que, según la experiencia de los autores, requieren dosis muy altas de radioyodo y, en tales casos, es muy frecuente la susistencia de hipertiroidismo posterior al tratamiento.
- Bocios uni o multinodulares en los que el centellograma revela zonas frías. Para estos casos el tratamiento de elección es la exéresis, pero cuando se agregue alto riesgo quirúrgico por el estado cardiovascular u otras causas, el radioyodo será optativo.

La meta de todo tratamiento, obviamente, es la de llevar al paciente al eutiroidismo. A tal fin, el problema esencial reside en la justipreciación de la medida de la radiactividad que corresponde suministrar en cada caso, estando esta dosis condicionada a

variables individuales. Este problema lo resuelven algunos autores mediante la administración de dosis relativamente pequeñas (2 mCi) repetidas a intervalos de dos semanas, aproximadamente, hasta obtener la remisión de los síntomas. Pero la mayoría prefiere el empleo de una dosis única cuya medida está sujeta a cálculo para cada paciente mediante fórmulas que incluyen los siguientes parámetros" peso de la glándula, tiempo medio efectivo, captación máxima, depuración tiroidea, etc. Obviamente, el peso de la glándula resulta de una apreciación subjetiva por parte del tratante, que generalmente se basa en su experiencia. En cuanto al valor de los otros parámetros, cabe advertir que es aleatorio, pues el radioyodo en dosis terapéuticas no siempre se comporta de igual modo que en función de trazador. Por otra parte, el déficit de yodo alimenticio, o su exceso en el uso de sal yodada, causa modificaciones metabólicas que se agregan a la complejidad del cuadro. La obligación al uso de sal yodada impuso modificar algunos parámetros que se empleaban para el cálculo de la dosis. Pero tal vez el factor de mayor gravitación sea la sensibilidad individual, condicionante en última instancia del resultado del tratamiento. El cúmulo de las circunstancias expuestas impide concebir

una fórmula universal para el cálculo de la dosis,

pero aún así consideramos útil disponer de una, a modo de orientación. La que ha sido más generalmente adoptada es:

$0.100 \text{ mCi} \times \text{peso de la glándula en gramos}$

$= \text{mCi.}$

Captación máxima (expresada en fracción de dosis).

En términos generales, la dosis a administrar por gramo de peso de la glándula varía, según los autores, entre 0.100 y 0.150 mCi.

5.4 CENTELLOGRAFIA DE LAS GLANDULAS SALIVARES.

El examen radioisotópico de las glándulas salivares no se ha generalizado, a pesar de que existe la posibilidad de su visualización. Esta puede aportar elementos de juicio útiles a los fines diagnósticos y para el control de tratamientos y ofrece la ventaja de poder realizarse mediante un procedimiento simple e inocuo.

El trazador de elección para el estudio de las glándulas salivares es el pertecnetato. Este es captado por las glándulas acinosas, pero no se fija en ellas, sino que pasa a la luz de los canalículos intralobulares (a semejanza de lo que ocurre en el páncreas con la seleniometionina) -hecho verificado en animales por autorradiografía- y es excretado luego en la saliva. La visualización de la glándula se realiza durante la permanencia del trazador en los canalículos o incluso antes, durante la primera circulación del trazador.

El pertecnetato se administra por la vía i.v., en dosis de 1 a 4 mCi según la edad y el peso corporal del paciente. Si se planea realizar también en el mismo paciente la sialografía, esta debe postponerse

hasta después de la centellografía porque la sustancia de contraste ocasiona un proceso inflamatorio; lo previamente a la centellografía, pueden alterar la imagen. El equipo de elección es la cámara gamma, que permite el estudio morfológico, estático y dinámico. Con el paciente en ayunas, sentado frente al cabezal, tras de inyectar el pertecnetato, se obtienen imágenes en vista anterior y oblicuas; algunos preconizan la vista posterior (especialmente las oblicuas posteriores), que es ventajosa cuando se trata de estudiar solamente las parótidas, pero que no visualiza las glándulas menores (sublinguales y palatinas). En la práctica, realizamos fotos seriadas cada 5 minutos hasta cumplidos 20 - 30 minutos, momento en que se produce el pico de actividad; entonces se coloca en la boca del paciente 2 ó 3 gotas de jugo de limón o de vinagre, que estimulan la excreción glandular, y hacemos otras 2 imágenes, a los 5 y 10 minutos después, para registrar el vaciamiento. Cuando no se dispone de cámara, se coloca al paciente en decúbito y se registra con el centellografo lineal una imagen estática a los 20 - 30 minutos de la inyección y otra después de la intruducción del estimulante.

Un concepto fundamente ha de tenerse presente para la

interpretación de la centellografía realizada con cámara; la imagen que aparece inmediatamente después de la inyección procede del flujo sanguíneo vascular (primera circulación del trazador, radioangiograma), siguiéndole la visualización glandular procedente de los canalículos, cuya actividad se incrementa por retención hasta los 20 - 30 minutos para decaer después de introducir las gotas de limón que provocan la excreción salival.

La actividad visualizada en la imagen disminuye con la edad y, en los ancianos, por lo general, la concentración es débil.

Las alteraciones de la imagen configuran las siguientes posibilidades: que sea hipo-o hiperradiactiva, homogéneamente (en toda la glándula) o irregularmente (en este caso, coexisten áreas frías o calientes en relación con la actividad tibia del tejido normal restante).

En los procesos inflamatorios agudos, la imagen presenta hiperradiactividad, evidente desde la inicial que registra la primera circulación, porque la hiperradiactividad se debe en esta patología a la hiperhemia local y no a retención canalicular. El

estudio secuencial realizado a diario permite documentar la evolución del proceso. Cuando la inflamación se sigue de absceso, la imagen antes caliente se hace fría.

En las inflamaciones crónicas o recidivantes, prevalecen las imágenes hiporradiactivas producidas por fibrosis de la glándula, que produce constricción de los conductillos.

La enfermedad de Sjogren produce disminución de la actividad de las glándulas salivares que marcha pareja con la intensidad de la xerostomía. El resultado del tratamiento con ciclofosfamida puede objetivarse mediante el estudio centellográfico seriado.

Los tumores de las glándulas salivares son poco frecuentes, constituyendo alrededor del 0.5 por ciento de los que se encuentran en el organismo, pero aproximadamente un quinto de ellos son malignos. Para poder visualizarse en la centellografía, el tumor ha de tener un diámetro mínimo de 1 ó más bien 2 cm, lo que supone que en el examen clínico ya es visible o palpable; por tanto, la centellografía no puede considerarse como técnica de orientación para el diagnóstico precoz. De todos modos, el hecho es que

la inmensa mayoría de los tumores se visualizan como áreas frías o tibias. Los únicos que dan imágenes hiperradiactivas son los tumores de Warthin, lo que se explica en razón de su origen en el epitelio de los conductos; estos conservan la propiedad de acumular el material de secreción y volcarlo en cavidades quísticas que no se vacían rápidamente y causan la apariencia hiperradiactiva del tumor. En los tumores mixtos, que son los más frecuentes, la imagen es despareja. Los otros tumores de la región, sean intrínsecos de las glándulas salivares o adyacentes invasores, pueden destruirlas, produciendo áreas frías, o desplazarlas y deformarlas, creando imágenes asimétricas, hecho significativo para la interpretación diagnóstica. La imagen de los quistes es siempre fría.

En la enfermedad de Mikulicz, proceso linfomatoso del que participan las glándulas salivares, generalmente se visualiza agrandamiento e hipofijación del pertecnetao. En cambio, el Ga, que es captado por el tejido linfoideo, produce una imagen positiva, con la ventaja de que evidencia, además, eventuales linfomas en otras localizaciones.

La terapia radiante sobre las células de cabeza y/o

cuello causa en las glándulas salivares comprendidas en su campo una pérdida progresiva de la actividad verosímilmente consecutiva a la inflamación actínica.

En los procesos obstructivos de los conductos excretores, la centellografía es muy útil cuando se realiza el estudio dinámico. La retención del trazador después de la estimulación y la no coincidencia (por retardo de evacuación) de la simetría glandular son muy significativas. Cuando estas características son evidentes resulta innecesaria la cateterización del conducto, que siempre implica trauma.

Los estudios de índole funcional (curvas) con fines diagnósticos resultan poco informativos, por lo cual se omite su consideración.

En síntesis, puede afirmarse que la centellografía de las glándulas salivares con pertecnetato posee utilidad clínica, es inocua y no causa trauma ni molestias.

Su realización está indicada para el seguimiento de los procesos inflamatorios; para el diagnóstico de tumores mayores de 2 cm de diámetro, por la posible

orientación sobre su identificación (tumores de Warthin); para verificar la imagen de un absceso; y, posteriormente a la cirugía, para evaluar la masa de tejido funcional restante; para la comprobación de agenesia o de la existencia de glándulas aberrantes; para el diagnóstico diferencial con formaciones tumorales cervicales; y para el diagnóstico de procesos obstructivos de los conductos. Evidentemente, se trata de un estudio que, asociado a la clínica, puede aportar elementos de juicio de utilidad para definir el diagnóstico y evaluar la terapéutica.

5.5. CENTELLOGRAFIA ÓSEA

El esqueleto constituye un tejido vivo y singularmente dinámico, en constante proceso de formación y reabsorción. Fue considerado antes una mera estructura de sostén, inactiva desde el punto de vista metabólico, concepción que se modificó al comprobarse la incorporación de fósforo, fluor y estroncio radiactivos en tejido normal y en tumores óseos. La centellografia ósea configura una técnica de reconocimiento de áreas donde el recambio óseo está acelerado.

La centellografía fue introducida como método de diagnóstico en 1961 al demostrarse que el ^{85}Sr se localiza en el hueso normal y que su concentración aumenta en áreas esqueléticas anormales. Desde entonces se ha incorporado como método de rutina para la detección de todos los procesos que afectan el esqueleto y que son susceptibles de provocar una reacción reparativa. Esto interesa en especial en casos de tumores malignos primitivos de partes blandas, que tienen tendencia a originar metástasis óseas. Posteriormente, debido al interés especial en reducir al mínimo la radiación corporal, fueron incorporándose al uso otros trazadores: ^{18}F , $^{87\text{m}}\text{Sr}$ y compuestos de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y de $^{113\text{m}}\text{In}$.

Para la interpretación del proceso que determina la incorporación de los radiofármacos en el tejido óseo, conviene recordar que éste está formado por una matriz orgánica en la que hay una fase cristalina; la matriz está integrada por polímeros de ácido glucurónico y hexosamina en los que se hallan en suspensión fibras colágenas, osteocitos y endotelio vascular. El componente principal de la fase mineral es una sal cálcica, la hidroxiapatita. Sus cristales tienen forma de agujas envueltas en un medio acuoso, de modo que los iones circundantes pueden intercambiarse en la

capa de calcio hidratado con fosfatos e iones hidroxilos de la superficie del cristal. La fijación de los radiofármacos con afinidad por el tejido óseo está vinculada o con el proceso de recambio ("turnover") mineral y de perfusión sanguínea, o con el metabolismo de la matriz proteica.

Todavía no se dispone de un trazador ideal que se localice selectivamente en el esqueleto. Por razones metabólicas, el más indicado habría sido el ⁴⁷Ca, pero ha sido desechado por la elevada energía de sus radiaciones. El estroncio, por su comportamiento biológico similar al calcio (12), se impuso precozmente; en la década del 60, la mayor experiencia se adquirió con el ⁸⁵Sr, emisor gamma puro que es captado rápidamente por el hueso y fijado fuertemente al cristal de hidroxiapatita. Tiene el inconveniente de su semiperiodo prolongado (64 días), pero el tiempo medio efectivo en el organismo se reduce a unos 20 días, de lo que derivan ventajas y desventajas. Su mayor inconveniente reside en la alta dosis de radiación en comparación con la de los compuestos actualmente en boga. Hoy se emplea ocasionalmente para la centellografía lineal: se administra alrededor de 150 uCi de ⁸⁵Cl Sr vía i.v. y la centellografía se realiza 27-72 horas después, intervalo en que los

tejidos extraóseos se depuran del trazador. Entre sus ventajas cabe mencionar que, ante una imagen de interpretación dudosa, permite la repetición del estudio, aun días después de inyectado, sin administración adicional. Pero su tiempo medio efectivo limita la posibilidad de hacer estudios actualizados a intervalos breves para objetivizar la evolución del proceso.

85

La centellografía normal con ^{85}Sr en el adulto visualiza aumento de concentración en las epifisis de los huesos largos, en torno a los acetábulos, en las articulaciones sacroiliacas, en las vértebras y en los huesos del carpo y tarso, con una distribución simétrica en relación con el plano medio del cuerpo. El hecho de que parte del radioestroncio se elimina por el colon puede ocasionar imágenes positivas falsas, especialmente sobre el raquis lumbosacro, por lo que hay que prescribir enemas de evacuación previamente a los registros.

Los compuestos marcados con tecnecio son actualmente los trazadores más empleados. Los polifosfatos, pirofosfatos, difosfonatos y metildifosfonato marcados con tecnecio se concentran en el esqueleto no solo en la fase mineral, sino también en la matriz orgánica,

en una proporción que se aproxima al 50% de la actividad administrada; el resto es eliminado principalmente por la vía renal. Las ventajas de la utilización de estos compuestos residen: en la baja energía del tecnecio, muy adecuada para su empleo en la cámara gamma; en su semiperíodo biológico corto, que implica menor dosis de radiación; y en la posibilidad de emplear actividades altas que permiten estudios actualizados en serie a intervalos cortos para un control evolutivo. Las dosis a administrar son: para la centellografía lineal 5-10mCi; y para la cámara 20-25 mCi. Ambas se administran por la vía i.v.

Por último, cabe mencionar un quelato marcado con ^{113m}In

In, el etilendiaminotetrametilfosfórico (EDTMP), cuyo comportamiento metabólico se equipara al de los poli y pirofosfatos. Las características físicas del ^{113m}In

In no se adecúan a la cámara de centelleo; en cambio las imágenes que se obtienen con el centellógrafo lineal son adecuadas. Es recursomuy apropiado para las unidades de asistencia que no disponen de generadores de tecnecio.

Los equipos apropiados para la centellografía ósea con los trazadores referidos son: la cámara de centelleo,

cuando se utilizan compuestos fosfatotecnecio (los modelos recientes de cámaras posibilitan obtener una imagen del esqueleto total abarcado en una placa radiológica, realizándose un registro en cada decúbito, prono y supino); y el centellografo lineal, ⁸⁵ que realiza imágenes demostrativas con Sr y con ^{113m}In - EDTMP.

En la centellografía normal ósea con compuestos de tecnecio, practicada en individuos aún en la etapa de crecimiento, la fijación del trazador se realiza solo en el esqueleto osificado, visualizándose áreas e mayor actividad en las zonas de osificación (cartilagos en crecimiento). En la edad mediana - con variantes según el sexo - se visualizan: la columna vertebral, con concentración uniforme o con diferencias de gradiente moderado, con cámaras de buena resolución se definen las vértebras y sus apófisis); el cráneo, el esternón, los extremos de las costillas, las escápulas, las crestas iliacas, las áreas acetabulares, los trocánteres, las rodillas y las epifisis de los huesos largos. Los detalles esqueléticos muestran mejor definición en los jóvenes, los varones y las personas delgadas. A medida que la edad aumenta, las localizaciones periféricas van disminuyendo y las imágenes pierden definición, esto

ocurre también en la obesidad, especialmente en las mujeres. De manera general, el esqueleto aparece simétrico con referencia al plano medio; en el centellograma del esqueleto completo, cuando no existe alteración del metabolismo óseo, el diagnóstico de anormalidad se confirma por comparación de áreas simétricas, aunque hay que recordar que existen enfermedades óseas que no alteran la simetría.

Frecuentemente, se visualizan los riñones por ser éstos la vía principal de excreción, así como la vejiga. Esto puede interferir en la correcta interpretación de áreas de hiperfijación pelviana, cualquier duda se aclara haciendo una vista de perfil o repitiendo la imagen después de la micción.

Cualquiera que sea el compuesto empleado, la existencia de aumento de concentración en una o más áreas óseas configura la existencia de una anormalidad que exterioriza un proceso en el cual la aposición y la reabsorción cálcica están aceleradas. Sin embargo, esa imagen no implica definición etiológica.

Los aportes más significativos de la centellografía ósea a la clínica se vinculan con la oncología (en la infancia, con los procesos inflamatorios,

osteomielitis). Con alta frecuencia, se localizan en el esqueleto las metástasis del carcinoma de mama y de próstata, las cuales se traducen por áreas de concentración que se deben a fijación del núclido, no en las células neoplásicas, sino en el tejido óseo reactivo adyacente. La identificación de un área anormal de hiperfijación se facilita siempre que sea posible la comparación con el área simétrica contralateral.. Cuando dicha hiperfijación se localiza en el eje medio y por tanto, no existe el recurso comparativo, se juzga por el aumento de la concentración, sea en uno o en más de los cuerpos vertebrales, es decir, se juzga si el aumento se produce de acuerdo con el gradiente paulatino normal de la columna o si la diferencia es más bien neta.

El centellograma positivo acompañado de aumento de la fosfohexosaisomerasa sérica indica en favor de metástasis de cáncer de próstata o de mama; en este último caso, la trascendencia de la verificación radica en que frente a ella, la mastectomía, operación mutilante, está contraindicada. La visualización centellográfica de la metástasis puede preceder al diagnóstico clínico de la localización primitiva. Además, en un porcentaje elevado de casos se presenta una centellografía positiva - confirmada luego por

punción biopsia - antes de la evidencia radiológica; es raro que ocurra lo contrario. La disminución paulatina de la concentración radiactiva de las metástasis, objetivada mediante centellografías seriadas, constituye un síntoma favorable en el cáncer de mama bajo opoterapia y en el cáncer de próstata en tratamiento con estilbestrol.

Ciertos tipos de metástasis osteolíticas se visualizan centellográficamente como imágenes frías encuadradas en áreas de concentración normal; estas se llaman imágenes fotón deficiente o negativo. Los autores las han observado en pacientes con cáncer digestivo y de mama; en un segundo registro utilizado citrato de tecnecio como trazador, la imagen resultó positiva - comprobación de interés práctico como guía para la punción biopsia.

Las metástasis del cáncer de tiroides tienen la particularidad de ser generalmente positivas cuando se utiliza como trazador el ¹³¹I y negativas con los trazadores para tejido óseo.

Los tumores primitivos de los huesos (osteosarcoma, condrosarcoma, tumor de Erwing, granuloma eosinófilo, quiste aneurismático, etc) causan áreas

hiperradiactivas, sin que de esa imagen pueda inferirse si se trata de un proceso benigno o maligno.

La centellografía permite también en los linfomas un reconocimiento más precoz que la radiología y, en este caso particular, es útil realizar un nuevo registro con galio (⁶⁸Ga); si en éste se reproduce la imagen anterior, aporta un elemento de juicio a la presunción etiológica en favor de linfoma (Hodgkin). En cambio, en el mieloma, la expresión radiológica precede a la centellográfica.

En la espondiloartrosis evolutiva suelen visualizarse áreas de concentración aumentada cuya interpretación etiológica se resuelve mediante un estudio comparativo con la imagen radiológica.

En la osteomielitis piógenas, la tuberculosis activa y las fracturas en estado de consolidación (hasta dos años después de ocurridas), se evidencian áreas con aumento de concentración. En la osteomielitis, este fenómeno puede visualizarse a las 24 horas de iniciarse el proceso, anticipándose a la radiología en 10 a 14 días. La comprobación de este fenómeno es de particular interés en las fracturas cuando éstas ocurren en zonas de difícil identificación

radiológica, como son los huesos del carpo.

En la enfermedad de Paget, la centellografía visualiza, en las localizaciones que le son características, áreas de concentración radiactivas a veces más extensas que las evidencias radiológicas; además, es posible, mediante registros secuenciales, seguir la evolución del proceso y el control de ensayos terapéuticos.

En enfermedades metabólicas (osteomalacia), en el hipertiroidismo y después de terapia esteroidea prolongada, puede producirse un traslado de la densidad radiactiva, con disminución en el área axial y aumento en los huesos largos y el cráneo.

En la necrosis aséptica, el centellograma óseo muestra una zona fría y complementariamente, el centellograma del sistema reticuloendotelial con compuestos coloidales revela ausencia de actividad medular, configurando un síndrome por falta de irrigación. NO obstante, otras veces se visualiza como área caliente, traduciendo aumento de la actividad osteoblástica y de la irrigación del tejido óseo adyacente. También susceptibles de evidenciar disminución de la concentración del trazador son las fibrosis

postirradiación, el infarto óseo reciente y los estados de desuso.

En las centellografías con fosfatos de ^{99m}Tc pueden comprobarse áreas calientes extraesqueléticas en tejidos blandos, por fijación del compuesto en tumores, hígado y bazo. Pero con mayor frecuencia, se visualizan los riñones, vía principal de excreción y alteraciones de éstos; captación renal asimétrica, áreas frías, áreas calientes producidas por masas ocupantes (metástasis prostática o broncogénica), obstrucción de vías urinarias, neoplasia vesical, etc.

De lo expuesto merece destacarse que, si bien no disponemos aún del trazador ideal para la centellografía ósea, las necesidades se satisfacen con los radionúclidos de los cuales si disponemos: los compuestos de fosfatos marcados con tecnecio (mediante los cuales, si se cuenta con una cámara gamma provista del aditamento "ad hoc", puede realizarse la imagen del esqueleto total en una placa radiológica, lo que cumple el "desideratum" y el ^{131m}In EDTMP, que se usa de preferencia, y el ⁸⁵Sr para la centellografía lineal.

La indicación principal de la centellografía ósea es

la detección de metástasis óseas, las cuales se presentan con mayor frecuencia en las neoplasias primitivas de mama y de próstata, aunque este dato no excluye a ningún otro órgano o sistema como origen posible. El hallazgo centellográfico precede generalmente a la verificación radiológica e incluso puede ser la primera comprobación del tumor primitivo antes del diagnóstico de éste. Además de sus indicaciones a los fines diagnósticos, interesa para vigilar la evolución de la patología y controlar la eficacia de la terapia. Cuando se utilizan como trazadores los compuestos de fosfatos, la visualización complementaria del sistema urológico puede revelar alteraciones insospechadas de este que sean de interés adicional para el tratamiento. La centellografía y la radiología no son métodos competitivos, sino complementarios.

BIBLIOGRAFIA

- Price, W.J., Nuclear Radiation Detection, 2da, ed. Nueva York: McGraw Hill Book Co, 1964.
- Glasstone, S., Principles of Nuclear Reactor Engineering. Princeton, N.J. Van Nostrand Col, Inc 1955.
- Mitta, A. y col "Preparación de Compuestos marcados con ¹³¹I, ¹²⁵I e ¹³²I en la CNEA de la R. Argentina desde 1961 a 1969" Rev. Biol. Med. Nucl., 2, 82, 1969.
- Suárez, A.H.F. de, y col. " normas para la preparación y control ^{99m}Tc de radiofármacos del ^{99m}Tc" Buenos Aires, v congreso argentino de la asociación de biología y medicina nuclear, noviembre 1977.
- Watanabe, T., y col. " ^{133m}In EDTMP en Centellografía ósea" Rev. biol. Med. Nucl., 8: 103, 1976.
- Degrosis, D.J., "La medicina nuclear en el diagnóstico de las afecciones tiroideas" Rev. Biol. Med. Nucl., 2:57, 1970.
- Means, J.H., L.J. De Groot y J.B. Stanbury, Enfermedades del tiroides. Barcelona: Ed. Toray, 1966.
- Werner, S.C. y S.R. Ingbar, El tiroides. Conocimientos básicos y Clínica. Barcelona, Salvat, 1977.

Touya, E., y col. "valor de la centellografia encefálica" Acta Neurol, Latinoamer., 14:325, 1968.

Chieweiz, D., y G. von Hevesy, "Radioactive Indicators in the study of Phosphorus Metabolism in Rats" Nature (Londres), 136:754, 1936.

Volker, J.F., y col., "The absorption of Fluoride by enamel dentin bone and hydroxyapatite as shown by Radiactive Isotope" J.Biol. Chem. 134:543, 1940.