UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"OBSERVACION SOBRE LEUCOCITOS DE RANA SOMETIDOS A IRRADIACION GAMMA DEBIL."

GARCIA JIMENEZ NATIVIDAD SARA CONCEPCION

QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO

1 9 7 9

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS. TESIS 1979
ADQ. M.t.1 130
FECHA
PROC.
$

FACULTAD DE QUIMICA - D.E.P.
U.N.A.M.
BIBLIOTECA

JURADO ASIGNADO AL TEMA:

PRESIDENTE	QFB IGNÁCIO DIEZ DE URDANIVIA.
VOCAL	ING. JUAN LARTIGUE GORDILLO.
SECRETARIO	QFB ANDREA GABAYET MARTIN.
PRIMER SUPLENTE	QFB GUADALUPE CARRASCO RIVERA.
SEGUNDO SUPLENTE	ING. JAIME BRIMAN EPELSTEIN.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

DEPARTAMENTO DE FISIOLOGIA:

FACULTAD DE MEDICINA,

U N A M

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

NATIVIDAD SARA CONCEPCION GARCIA JIMENEZ

NOMBRE DEL ASESOR DEL TEMA:

ANDREA GABAYET MARTIN

NOMBRE DEL SUPERVISOR TECNICO:

ROBERTO FOLCH FABRE

ESTE TRABAJO SE REALIZO EN EL LABORATORIO 507, DEL DEPARTAMENTO DE FISIOLOGIA DE LA FACULTAD DE MEDICINA U. N. A. M., A CARGO DEL DR. ROBERTO FOLCH FABRE, A QUIEN EX-- PRESO MI AGRADECIMIENTO.

I N D I C E

	PAGINA
INTRODUCCION	1
GENERALIDADES	4
ANTECEDENTES AL TRABAJO EXPERIMENTAL	29
EXPERIMENTACION	37
RESULTADOS	41
DOSIS APLICADA COMPARACION CON ESTUDIOS DIAGNOSTICOS COMUNES	43
CONCLUSIONES	50

El escritorio de Konrad Röentgen en su despacho del Instituto de Física de la Universidad de Würzburg, en Bavaria, donde fueron descubiertos los rayos X. El retrato rectangular es una fotografía de Röentgen. Del lado izquierdo, una radiografía de la mano de su esposa. En el centro, el diploma del premio Nobel otorgado a Konrad Röentgen en 1901 - el primer premio Nobel de física. (Tomado de Etter, I.E.:The Science of Ionizing Radiation. Charles C. Thomas, Springfield, Ill., USA, 1965.)

CINZANO

EXCELSIOR
EL PERIODICO DE LA VIDA NACIONAL

Domul
COMO EL MEJOR DEL MUNDO

AÑO XXIX — TOMO IV RAFAEL ALDUCIN RODRIGO DE LLANO MEXICO, D. F.—MIERCOLES 8 DE AGOSTO DE 1945 GILBERTO FIGUEROA NUMERO 10230

Hiroshima, Ciudad de 343,000 Habitantes, Dejó de Existir

Se Cree que la Rendición del Japón es Cuestión de Semanas

Síntesis Mundial

Hablará de un Ultimatum que le Dará 48 horas Para Rendirse o ser Destruida con Atomas

Por RAFAEL ALDUCIN

Habla el Secretario de Educación

El Problema de la Cultura y la Alfabetización de México

Trascendental Entrevista de EXCELSIOR con el Sr. Torres Bodet, Registrada en un Grabador

Por CESAR LANZAS RAMOS, redactor de EXCELSIOR

Ya Acentúa la Creencia de que Podría Ir Jugara

Una Bomba Atómica Bastaría Para Destruir Nuestra Ciudad

Un Kilo de Materia Desintegrada Equivale a 25 Millones de Kilowatios Hora

Por PABLO PEÑA VASQUEZ, reportero de EXCELSIOR

Alemán en Esperado el Domingo en Hgo

Urgente Freno de Abusos de Choferes

La Camara del Trabajo de México no es Apolítica

Decisiva Arma Para Hacer la paz

Se Juega que la Nueva Bomba Hará Innecesarias las Guerras

Por ARTHUR MACKLIN

Más Beneficio que Daño a México el Tratado de Agua

Pedirán un Reparto 240,000 Mexicanos Ahora Tornan

Recaudación Torrenos Hoy, los Burócratas

Yo Escuché la Explosión Atómica, Dice Raúl O'Leary

La Tierra se Estremeció y la Atmósfera Adquirió Tonos Violetas

Por ARTHUR MACKLIN

La Bomba Causó Fuerte Baja de los Valores

Semana Científica Contra la Calpoara

Distinguidos Oftalmólogos Norteamericanos Vienen a México

Desaparecieron mil Manzanas de Casas por la Bomba Atómica

Los Aviadores que Arrojaron el Proyectil, Hacen un Relato de los Increíbles Efectos de la Explosión

GUAM, Marianas, miércoles 8 de agosto. (AP).—Una superficie de más de dos millones de metros cuadrados (casi mil manzanas de casas), "es ya el 50 por ciento de Hiroshima, fue eliminada totalmente por la devastadora bomba atómica arrojada el lunes por los aviadores de la Fuerza Aérea Estratégica de los Estados Unidos", informó el Cuartel General de la Fuerza Aérea Estratégica del Ejército de los Estados Unidos.

Como importantes metas industriales fueron aniquiladas en la ciudad, que tiene más de 343,000 habitantes, según el último censo.

"Se necesitan varios días para que la zona totalmente destruida", agregó el parte, que se funda en los fotografías tomadas durante los vuelos de reconocimiento del día, antes de la caída de la bomba atómica. Se dice que la bomba fue arrojada por una superfortaleza, en la que se movía la conferencia de la bomba, arrojada en paracaídas, que se abrió a 1,500 metros de altura, para que los aviadores pudieran escapar sin ser alcanzados por los efectos de la bomba. Los aviadores se encontraban a considerable distancia del lugar donde estaba cuando ésta hizo pedazos

"Dios mío!", Exclamaron los Aviadores Sobre Japón

El Acontecimiento más Revolucionario de la Historia

Junta Extraurgente del Gabinete Nipón Para Discutir Cambios, por la Bomba de Atomos

Afectará a Media Industria Petrolera la Energía Atómica

Produce una Reacción de Fuerza en Tokio la Destructora Arma de los Americanos

No se Requiere la Tarjeta de Identidad

El Presidente Ruiseño la Obligación de que se Reemplace

Se Explica el Manejo de Azúcar por la Reguladora, a Través de sus Tiendas

Es el Cine Desalojado la Manifestación

EXCELSIOR - Miércoles 8 de Agosto de 1945

INTRODUCCION

Los rayos X entran en la historia del hombre en 1895, y la radiactividad natural es descubierta al año siguiente. Estos descubrimientos se asocian con los nombres de Konrad Roentgen y de Henri Becquerel. Durante los siguientes cincuenta años, se investigaron y aprovecharon las radiaciones artificiales y naturales en física, en biología y en medicina. Luego, en 1945, sobrevino un cambio cualitativo en la notoriedad de la radiactividad, con el uso militar que le dieron personas cuyos nombres más valdría poder olvidar. De un día a otro pasó a primer plano el potencial mortífero de las radiaciones ionizantes, no sólo las empleadas por los militares, sino también las que acompañan la liberación de energía en los reactores atómicos.

Desde Hiroshima pasaron 33 años durante los cuales nuestros conocimientos acerca de los isótopos y de los rayos X, así como su empleo, siguieron ampliándose, a la par que se multiplicaban las radiaciones, las substancias radiactivas y los centros de producción de las mismas, con todos tipos de finalidades (arsenales atómicos y reactores de investigación o industriales). En estos 33 años, ninguna posición alrededor del problema de las radiaciones ionizantes pudo haber sido objetiva. Desapareció la noción misma de objetividad. Siempre hubo una polarización de los análisis, tendiendo unos a subrayar exclusivamente las ventajas y adelantos de estas técnicas, otros a destacar exclusivamente también los peligros que entrañan. La querella se prolonga dentro de los medios científicos, donde aparecen campos clara-

mente definidos en pro y en contra, y con ellos el concepto de "dosis permitida" o "aceptable" y las nociones de "dosis altas" y "dosis bajas". En cuanto a las dosis altas, nadie pone en duda sus peligros, aunque algunos sigan dispuestos a exponerse a ellos; pero no así para las "dosis bajas", "permitidas" o "aceptables", pues hay quien niegue toda noción de "umbral" que separase lo permitido de lo prohibido en cuanto a radiactividad.

Resulta imposible olvidar este marco en cuanto se trabaja con radiaciones ionizantes, y en lo que sigue no podremos sustraernos a este tipo de juicio de valores.

El presente estudio forma parte de un conjunto de experimentos que se inició con la observación casual de que las dosis de radiaciones supuestamente inocuas o suficientemente bajas para considerarse así ocasionaban alteraciones en el electrorretinograma del gato (Marmasse; véase adelante). Las verificaciones a las cuales condujo esta observación abarcaron estudios realizados principalmente con batracios, tanto in vitro como in vivo, y cuyo plan general, modificado varias veces en función de los resultados parciales, llegó a incluir el tema que nos ocupa, a saber, el recuento de granulaciones en leucocitos eosinófilos de la rana. Este plan general de trabajo prosigue, como veremos más adelante. El denominador común en todos estos estudios es la aplicación de "dosis" netamente inferiores a las que suelen utilizarse en los estudios diagnósticos a base de isótopos o de rayos X.

Proponemos el siguiente esquema de exposición: En primer lugar, creemos necesario destacar en forma resumida aspectos indispensables acerca de la naturaleza de las ra-

diaciones y de sus interacciones con la materia, viva o no. A continuación, estaremos obligados a reflexionar sobre el concepto de "dosis", que hemos cuidado de entrecomillar hasta ahora. Hecho esto, podremos describir con mayor provecho los antecedentes de la experimentación personal, la experimentación en sí, y sus probables perspectivas. Como parte final tendremos que volver a preocuparnos de los asuntos mencionados en un principio, o sea, tratar de justificar alguna posicion en pro o en contra del uso y abuso de las radiaciones ionizantes, cuya posición habrá sido alcanzada, en parte cuando menos, merced al conocimiento derivado del estudio experimental.

No pensamos dar aquí definiciones in extenso de la naturaleza de las distintas radiaciones ni de las distintas interacciones que establecen con la materia. Supondremos conocidos los aspectos fundamentales de estas cuestiones. En todo caso el lector interesado en profundizar en estos asuntos podrá recurrir con ventaja a tres textos fundamentales (1,2,3).

---

(1) ANDREWS, H.L.: RADIATION BIOPHYSICS. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1961.

(2) ETTER, L.E.: THE SCIENCE OF IONIZING RADIATION. Charles C. Thomas, Springfield, 1965.

(3) TUBIANA, M., DUTREIX, J., DUTREIX, A., y JOCKEY, P.: BASES PHYSIQUES DE LA RADIOTHERAPIE ET DE LA RADIOBIOLOGIE. Masson & Cie., Paris, 1963.

GENERALIDADES

Desde el punto de vista teórico las cosas parecen bastante claras (fig. 1). Por una parte, se encuentran las

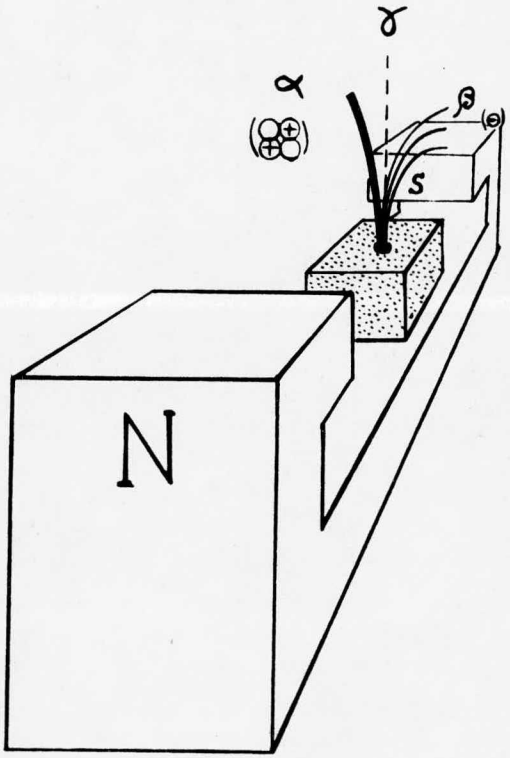


FIGURA 1 - Experimento de Becquerel: El hueco en el bloque de plomo contiene uranio. El hecho de que las radiaciones emitidas sean desviadas por el campo magnético en la forma indicada permite deducir que poseen cargas eléctricas positivas (alfa), nulas (gamma), y negativas (beta).

radiaciones constituídas por partículas (alfa y beta), nucleos de helio de masa elevada, electrones de masa reducida, lo que guarda relación con un poder de penetración de mucho mayor para los segundos que para los primeros. Parecería mas fácil entender el efecto sobre la materia de las radiaciones constituídas por partículas, pues se tiende a pensar en interacciones simples, similares a las que se observan macroscopicamente con las bolas de billar. Sin embargo, la realidad es diferente; es preciso pensar en interacciones entre campos magnéticos, más que entre cuerpos geometricamente definidos. Esto da origen a una serie de peculiaridades que dejaremos de lado, pues trabajaremos mucho más aquí con radiaciones gamma que con radiaciones formadas por partículas. Sin embargo, veremos más adelante que esta distinción es muy académica, por la génesis de electrones secundarios bajo la influencia de dicha radiación gamma.

En el grupo de las radiaciones electromagnéticas, consideradas tradicionalmente como no particuladas, aparece un nuevo problema, a saber, la necesidad de incluir en un mismo grupo radiaciones muy diferentes unas de otras, desde los rayos X más "blandos" (4), de energía mínima, hasta las

---

(4) En los tubos de Crookes utilizados para producir los primeros rayos X, la descarga eléctrica requería la presencia de gases residuales. Con el tiempo, parte de estos gases eran adsorbidos sobre las paredes, la presión disminuía, y el voltaje requerido para la descarga era mayor. En vista de esta dificultad, se decía que el tubo era "duro", en inglés "hard" que significa también difícil (de echar a andar en este caso). Por lo tanto, los tubos "duros" emitían rayos X producidos por descargas de alto voltaje, que tenían una energía y un poder de penetración mayores. Hoy día se siguen llamando "duros" los rayos X de gran energía, y "blandos" los de energía menor, aunque ya no se utilizan tubos de Crookes.

radiaciones gamma más penetrantes, con energías de varias decenas de MeV (5), como las de rayos cósmicos (fig. 2). El efecto de las radiaciones electromagnéticas sobre la materia varía tan profundamente con la energía de dichas radiaciones que no sería absurdo estudiar en forma completamente separada los rayos X característicos de ciertos estudios diagnósticos y los rayos cósmicos de que acabamos de hablar. Sin embargo, en vista de la unidad que les confiere su naturaleza intrínseca, suele dejárseles en una misma familia.

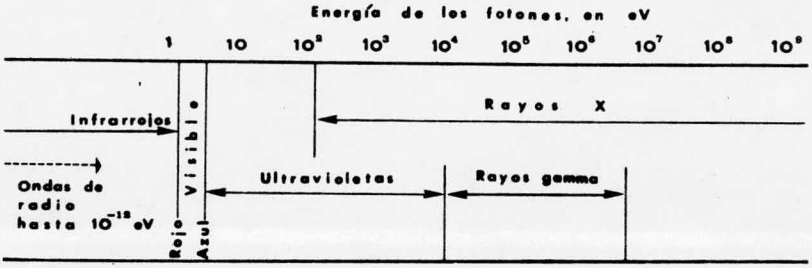


FIGURA 2 - El espectro electromagnético, en una escala logarítmica de energías. (Modificado de Andrews, H.L.: RADIATION BIOPHYSICS. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1961.)

(5) Se llama electrón Voltio (eV) a la energía cinética comunicada a un electrón acelerado por una diferencia de potencial de un Voltio. Es una unidad muy pequeña respecto a las unidades clásicas de la mecánica (cuadro 1), y suelen utilizarse sus múltiplos: keV (10^3 eV), MeV (10^6 eV) y GeV (10^9 eV).

1 MeV vale	1 ergio vale	1 Kwh vale	1 caloría vale	1 unidad de masa vale	1 gramo vale	
1	6.25×10^5	2.25×10^{19}	2.62×10^{13}	931	5.61×10^{26}	MeV
1.60×10^{-6}	1	3.60×10^{13}	4.18×10^7	1.49×10^{-3}	9.00×10^{20}	ergio
4.45×10^{-20}	2.78×10^{-14}	1	1.16×10^{-6}	4.14×10^{-17}	2.50×10^7	Kwh
3.82×10^{-14}	2.39×10^{-8}	8.60×10^5	1	3.56×10^{-11}	2.15×10^{13}	caloría
1.074×10^{-3}	671	2.42×10^{16}	2.81×10^{10}	1	6.02×10^{23}	U. M.
1.78×10^{-27}	1.11×10^{-21}	4.00×10^{-8}	4.64×10^{-14}	1.66×10^{-24}	1	gramo

CUADRO 1.- Correspondencia entre las diversas unidades de energía (TUBIANA, Op. cit., p.6).

En vista de que los rayos gamma que emite el cesio 137 tienen una energía promedio de 0.6 MeV (cuadro 4) podría tenerse la impresión de que las consideraciones relacionadas con la heterogeneidad de la familia gamma salen sobrando. Pero la verdad es que los diversos fenómenos de interacción entre radiación gamma y materia, que veremos más adelante , son capaces de heterogeneizar el haz gamma más cuidadosamente monocromatizado. Volveremos a encontrar esta precisión aparente en la teoría, acompañada de un empirismo entristecedor en la práctica, al hablar de todas y cada una de de las unidades de medición. Por ejemplo, el Curie pareció ganar exactitud cuando pasó a ser un número fijo de desintegraciones por segundo, en lugar de la radiactividad emitida por una masa patrón de un cierto elemento (6). Pero si no se establece la naturaleza de las radiaciones emitidas durante estas desintegraciones (alfa, beta o gamma) y las energías de estas radiaciones, la idea que se tiene , en sí muy insuficiente, resulta casi inútil (sobre todo cuando se plantea una interacción con la materia viva). El mismo número de milicuries de un emisor alfa y de un emisor gamma significan dos fenómenos diferentes, sin hablar siquiera de la necesidad de conocer la naturaleza química del isótopo involucrado, para saber de que combinación química podría llegar a formar parte.

---

(6) En 1910, el congreso internacional de radiología y electricidad escogió como unidad de radiactividad el CURIE: actividad del gas radón en equilibrio con un gramo de radio 226. En 1954, el congreso internacional de radiología dió una nueva definición del Curie: 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo.

Las unidades empleadas para la exposición y la absorción, el Roentgen y el Rad, también se nos presentan con atuendos de magnitudes exactas (7). Pero si leemos con cuidado la definición inicial del Roentgen, encontramos lo que algún autor llamara "una receta de cocina para realizar un experimento", más que definición. En el caso del Rad nos pasa al revés; 100 ergios, al parecer, satisfaría el espíritu; pero como no se nos dice como medirlos, el tal espíritu se queda satisfecho y en ayunas a la vez. Por lo demás, una tercera lectura de las dos definiciones nos hace ver que en

---

(7) EL ROENTGEN (R) es una unidad de exposición a rayos X y gamma. La exposición es igual a un R cuando la cantidad de electricidad creada por por los iones generados por los electrones secundarios puestos en movimiento en 1 cm^3 de aire (a temperatura y presión normales) es igual a 1 unidad electrostática C.G.S. El roentgen corresponde a una energía de 86.9 ergios por gramo de aire.

En cambio, el RAD es una unidad de absorción. Un cuerpo absorbió un Rad cuando recibió una energía de 1/100 de Joule por kilogramo o también, 100 ergios por gramo.

En la materia viva, no es seguro que los efectos de las radiaciones se deban a ionizaciones o absorción de energía solamente. Se creó así otra unidad, el REM (roentgen equivallent man): "cantidad de cualquier radiación que produce sobre el hombre los mismos efectos biológicos que la absorción de un Rad de rayos X de 250 keV" (a). (otros (b) hablan de rayos X o gamma con un LET de 3keV/micra en agua, emitidos a una intensidad vecina de 10 Rad/minuto).

El Rem está relacinado con el Rad a través de un coeficiente experimental llamado factor de calidad (FC) o eficacia biológica relativa (EBR) (respectivamente, QF y RBE en inglés): Dosis en REM = dosis en RÁD x RBE. RBE y QF dependen de numerosas variables: naturaleza de la partícula, del tejido, temperatura, etc. (c).

(a) Sciences et Avenir, N° 337, Marzo de 1975.
(b) Faires, R.A., y Parks, B.H.: RADIOISOTOPOS. Eudeba, Buenos Aires, 1963.
(c) Andrews, H.L.: Op. cit.

ambos casos, estamos frente a una especie de "ensayo fisico-químico", y en ambos casos también se nos pide medir cierto efecto inducido sobre la materia por el fenómeno que se trata de cuantificar. Para el Roentgen se nos dice qué materia y cómo buscar el efecto; para el Rad se omiten estas indicaciones, lo cual en parte facilita las cosas y en parte las complica. Enfín, cuando pasamos al dominio de las unidades derivadas, empezamos a sospechar que aquí, como en la administración pública, la multiplicación de subcomités sólo busca enmascarar la incapacidad de resolver el problema.

Antes de seguir adelante, debemos presentar en forma resumida las principales modalidades de interacción de las radiaciones ionizantes, tanto particuladas como electromagnéticas, con la materia.

En primer lugar, cabe distinguir dos fenómenos : la ABSORCION y la DIFUSION, cuya suma constituye la ATENUACION. Cuando un fascículo de radiación (se trata principalmente aquí de radiación gamma, por razones que veremos más adelante) sale de un medio material, su intensidad es menor que cuando entró; esta atenuación se puede considerar debida a dos tipos de acontecimientos: por un lado la difusión mediante la cual una parte de estos fotones salen en dirección diferente de la inicial (generalmente con energía diferente de la inicial también); y por otra la absorción, que implica que una fracción de la energía que tenían estos fotones quedó dentro del medio estudiado. Evidentemente, lo que nos importa en el momento de dosificar una radiación es este último aspecto, la fracción ABSORBIDA.

Tenemos pues que ATENUACION = ABSORCION + DIFUSION (fig. 3). Pero si pretendemos establecer quién fue atenuado, absorbido o difundido, y en que proporción, y de que manera, y por qué materiales simples o complejos, se abre ante nosotros un descorazonador ballet de coeficientes (volumétricos, de masa, lineales), y sólo nos queda tratar de esquematizar los principales mecanismos de interacción (todavía en el caso de los fotones).

Estos distintos tipos de interacción revisten importancias diversas según la energía del fotón incidente. Cuando se trata de isótopos que emiten gamma, como en nuestro estudio, la casi totalidad de la absorción (y también de la difusión) se debe al llamado efecto Compton (fig. 4 y 6).

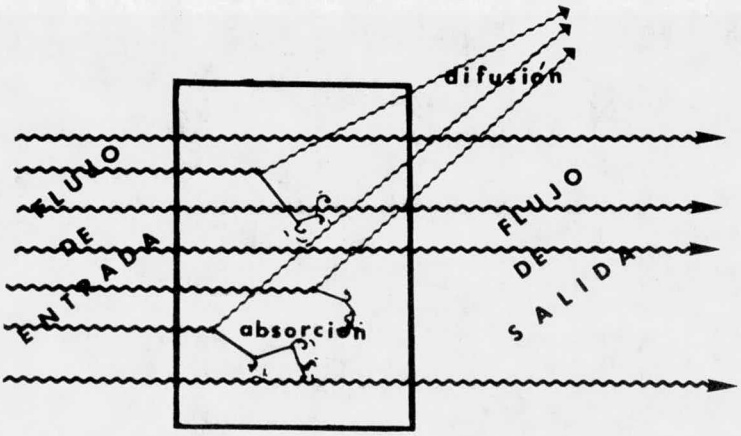


FIGURA 3 - Atenuación = { FLUJO DE ENTRADA - FLUJO DE SALIDA / absorción + difusión }

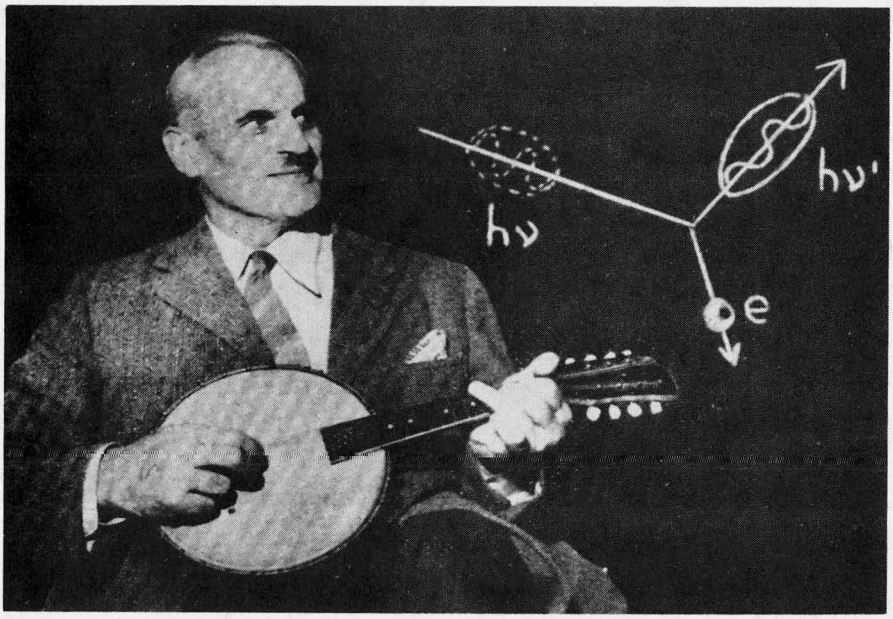


FIGURA 4 - Arthur Compton, quien tuvo la idea de comparar la interacción entre un fotón y un electrón al choque entre dos balas elásticas. El fotón de retroceso tiene menos energía, y una longitud de onda mayor, como se ve en el esquema. (De Gamow, G.: Matter, Earth and Sky. Prentice Hall, Inc., New York, 1958.)

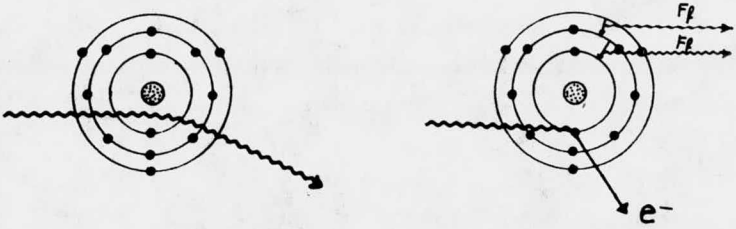


FIGURA 5 - Fotones de baja energía. A la izquierda, efecto Thomson o difusión elástica. A la derecha, efecto fotoeléctrico (electrón secundario y fotones de fluorescencia). Véase el texto.

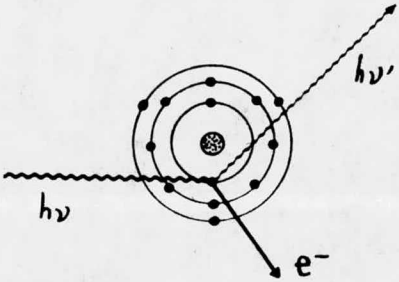


FIGURA 6 - Fotones de energía intermedia. Efecto Compton. Véase el texto.

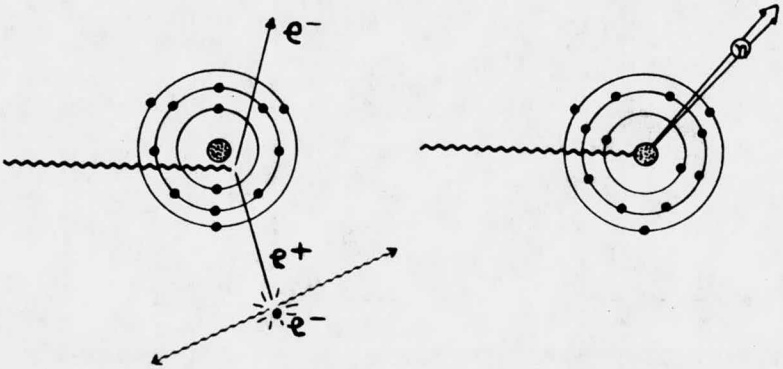


FIGURA 7 - Fotones de alta energía. A la izquierda, formación de pares y aniquilamiento del positón. A la derecha, reacción nuclear (emisión de un neutrón).

En este caso el fotón actúa sobre un electrón "planetario", (o periférico, o externo, u orbitario) o electrón "libre" (8). En vista de la gran desproporción entre estos fotones y la energía de enlace de los electrones en los átomos de Z relativamente pequeña, se puede considerar que practicamente todos los electrones son "libres" en la materia viva. El fenómeno resultante es la expulsión de un electrón, mientras

(8) En sentido estricto, no existen electrones "libres", salvo en los metales o las sustancias ionizadas; todo electrón se encuentra "sujeto" al átomo por la atracción electrostática entre su carga negativa y la carga positiva del núcleo. Para "liberar" un electrón, debe suministrársele una energía igual o superior a esta atracción, llamada "llamada energía de enlace". Para las capas electrónicas de cualquier átomo, esta energía de enlace no pasa de unos cuantos electrón-voltios, lo que resulta muy poco en comparación con las energías de enlace en las capas profundas, o la energía de los fotones X o gamma. Cabe considerar, pues, que son "libres" todos aquellos electrones cuyas energías de enlace resultan pequeñas frente a la energía de los fotones incidentes. Cualquier electrón externo es "libre"; y si bien los electrones internos (k) del plomo, por ejemplo, con una energía de enlace de casi 90 keV (ver cuadro 2) resultan "sujetos" para fotones incidentes de 100 a 200 keV, son tan "libres" como los externos cuando el fotón lleva una energía de orden de los MeV.

Z	Elemento	K	L_1 a L_3	M^1	N^1	O^1
6	C	0.284				
13	Al	1.56	0.087 -- 0.072			
26	Fe	7.11	0.849 -- 0.709	0.094		
29	Cu	8.98	1.10 -- 0.935	0.121		
47	Ag	25.53	3.83 -- 3.37	0.743	0.12	
74	W	69.51	12.09 --10.20	2.81	0.528	0.073
82	Pb	87.95	15.86 --13.03	3.85	0.843	0.148
92	U	115	21.76 --17.16	5.55	1.44	0.322

CUADRO 2.- Energía de enlace de los electrones, en KeV (TUBIANA, Op. cit., p. 779).

que el fotón se desvía y pierde parte de su energía. Así, aparece una radiación beta (el electrón secundario, que origina practicamente todas las ionizaciones en el material absorbente; a su vez, este electrón secundario también puede arrancar de sus órbitas otros electrones, que se llamarán delta), y una "nueva" radiación gamma, pues una energía diferente significa una diferente longitud de la onda acompañante del fotón.

Hay también difusión, en vista de que el fotón ya no sigue la dirección inicial. Repetimos que el efecto Compton representa con mucho la mayor parte de la interacción para radiaciones incidentes con energías del orden de las que poseen los fotones emitidos por el Cesio 137. Hay que advertir que lo que se presentó inicialmente como irradiación gamma por fotones de una determinada energía se transforma, desde las primeras interacciones, en irradiación mixta, gamma y beta, con una gama de energías amplísima.

Los demás tipos de interacciones, todavía en el caso de los rayos gamma, son el efecto Thomson, el efecto fotoeléctrico, la formación de pares y las reacciones nucleares (figs. 5 y 7). Los dos primeros efectos son propios de fotones de baja energía (del orden de las decenas de KeV) y en nuestra serie experimental resultan desdeñables. El efecto Thompson consiste en cambios de dirección de los fotones, sin disminución de su energía; es practicamente una difusión pura. El efecto fotoeléctrico consiste en que el fotón incidente expulsa un electrón de la órbita que ocupaba en el átomo, desapareciendo durante esta interacción; también en este caso es emitido un electrón secundario, pero no se trata de un electrón periférico, sino generalmente de un elec-

trón central, cuyo lugar en la capa correspondiente queda ocupado por un electrón procedente de una capa más superficial; este fenómeno de reacomodo intra-atómico se acompaña de la emisión de uno o varios "fotones de fluorescencia" cuya energía corresponde a las diferencias energéticas entre las capas involucradas.

En el caso de los fotones de gran energía, actuando generalmente sobre substancias de Z elevado, pueden materializarse a su paso por el intenso campo perinuclear, naciendo así dos electrones, uno positivo (positón, +) y uno negativo (negatón, -); esta "formación de pares" exige por parte del fotón una energía mínima de 1.02 MeV, puesto que cada electrón "materializa" el equivalente energético de su propia masa, o sea 0.511 MeV. Luego, el positón se aniquila al encontrar un negatón del medio, y este aniquilamiento origina dos nuevos fotones, cada uno con una energía de 0.511 MeV, emitidos en dos direcciones opuestas. Finalmente, también en el caso de las energías muy altas, los fotones pueden reaccionar directamente con los nucleos atómicos; un nucleo que absorbe un fotón alcanza un estado excitado inestable, y regresa luego a la estabilidad emitiendo una partícula de uno u otro género, de ordinario un neutrón. La formación de pares y las reacciones nucleares requieren fotones mucho más "energéticos" que los emitidos por el cesio 137, y es seguro que no se produjeron en nuestra serie experimental.

En el caso de las partículas, concretamente de los electrones, encontramos también una situación aparente inicial, y una situación real distinta. Un isótopo, al desintegrarse de una manera determinada, emite electrones que tien-

den a formar un haz relativamente monoenergético; así puede verse en las tablas que el Cs 137, por ejemplo, emite betas de 0.514 MeV. Pero en cuanto se inician las interacciones del electrón con la materia, la situación se modifica totalmente. No sólo los electrones iniciales van perdiendo energía, sino que los electrones "secundarios", llamados aquí electrones delta, poseen una energía distinta tanto de la del electrón inicial como de la que conserva este después de la interacción. Al irse repitiendo el fenómeno, el resultado es la presencia en la sustancia que recibe la radiación de una gama amplísima de electrones de diferentes energías.

Vemos pues que sin haber salido del propio campo de la radiación, particular o electromagnética, resulta muy difícil predecir la situación que corresponde a una determinada irradiación, salvo con referencia a ella misma.

Es posible producir emisiones "homogéneas" mediante el empleo de filtros, etc, en la serie de aplicaciones que exige esta variante, por ejemplo la radioterapia. Pero esta aparente homogeneidad se desmorona en cuanto se inician las interacciones entre radiaciones y materia.

Si ahora nos ocupamos de la forma en la cual la materia ABSORBE estas diversas emisiones, incluso supuestamente homogéneas, comprobamos el empirismo general alrededor de estos aspectos. Para hablar de una cierta cantidad de Roentgens hemos de precisar la sustancia absorbente (el aire), su volumen, la distancia que la separa de la fuente, y finalmente debemos especificar qué efecto preciso será buscado: la aparición de cargas eléctricas por ionización de los componentes de esta masa de materia.

Evidentemente, este proceder no es exclusivo de la radiobiología, y encontramos definiciones igualmente empíricas en otros muchos campos de la física. Pero resulta irritante ver que los Rads, considerados ya de manera directa unidades de absorción, sólo pueden ser relacionados con los Roentgens a través de coeficientes que cambian con cada material absorbente. No deja de recordar el caso de los "bioensayos" en farmacología y medicina. Si se quiere trabajar con un sistema que no sea el adecuado, el resultado es negativo (9). Por ejemplo, quien quiera medir la radiación del Cobalto 60 empleando una emulsión fotográfica propia de los rayos X blandos utilizados en odontología concluirá que no hay emisión.

Ya dijimos que esta situación no es exclusiva de este campo; pero ¿hasta qué punto es válida una definición o una dosificación que exige condiciones tan restrictivas?

No es necesario extendernos para concluir que incluso empleando cuerpos y sistemas simples, la cuantificación de la radiaciones es un problema muy difícil. Cabe ahora preguntarnos: ¿Cuál será la situación en un tejido vivo caracterizado por la presencia simultánea de tantos y tan diversos sistemas? En este campo de los efectos de las radiaciones sobre la materia viva, o los seres vivos (que no es obligatoriamente lo mismo), la situación se vuelve sumamen-

---

(9) Para estudiar experimentalmente el efecto sobre los epitelios de la falta de vitamina C en la alimentación (lo que constituye el escorbuto en el hombre), se debe utilizar una especie que requiere un aporte exógeno de ácido ascórbico, por ejemplo el cobayo. Si se escoge una especie que sintetiza el ácido ascórbico (por ejemplo la rata), no se tendrá ningún resultado. (LEUTHARDT, F., y EDLBACHER, S: Tratado de Química fisiológica. Aguilar, Madrid 1962).

te compleja. Desde ahora podemos citar unos cuantos hechos que derivan directamente de esta complejidad; por ejemplo, cualquiera que sea el mecanismo íntimo del efecto, una misma cantidad de radiaciones altera muchísimo más las enzimas dispuestas en una sola capa que la misma cantidad de enzimas disueltas en un volumen tridimensional. Todavía en el campo de la enzimología in vitro, aplicando radiaciones que van reduciendo progresivamente la función enzimática del sistema estudiado, se observa a veces que la proporción de enzima inactivada sigue aumentando después de que cesa la irradiación; o sea, siguen "rompiéndose" moléculas de enzimas que fueron "fragilizadas" durante la irradiación (10) (11). Cuando se estudia una misma respuesta enzimática, se encuentran grandes variaciones según el sitio de donde proceda el sistema enzimático; la fosforilación oxidativa casi no muestra alteraciones en hepatocitos expuestos a 600 Rads; en cambio, 30 Rads bastan para alterar la propia fosforilación oxidativa en células del bazo.

En contraste con lo anterior, se conocen casos espectaculares de lo que parece ser una protección específica; por ejemplo, la urea casi no protege contra las radiaciones los sistemas a los cuales es añadida; en cambio, la tiourea, que sólo difiere de la urea por la presencia de

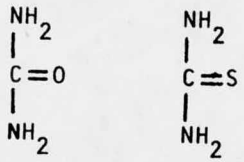
---

(10) TUBIANA, Op. cit., P 640

(11) Es clásica la analogía entre esta "fragilización" o "sensibilización de moléculas enzimáticas, y la "imagen latente" creada por la luz en una placa fotográfica. En ambos casos, la transformación ocurrida se "revela" más tarde, al actuar otro factor externo. Parafraseando el "viaje ahora, pague después" de las agencias de turismo, diríamos: "impresione ahora, revele después" — que se transformaría, para un ser vivo, en "irrádiese ahora, muérase después.

un átomo de azufre en lugar del de oxígeno (fig. 8), confiere a los sistemas una protección 10 000 veces mayor (12). Por lo tanto, frente a una protección tan específica, cabría pensar que el efecto de las radiaciones sobre las macromoléculas también es sumamente específico (13). Esta lista puede alargarse casi infinitamente, sin comprender siquiera las posibles alteraciones de los ácidos nucleicos (14).

FIGURA 8 - Urea (izquierda) y tiourea (derecha).



Es bien sabido que los ácidos nucleicos, por su enorme tamaño, por la relación entre su estructura lineal y su función, y por otros motivos diversos, son muy frágiles ante las radiaciones ionizantes. Sin embargo, no constituyen nuestra preocupación central en la serie experimental realizada, pues el factor tiempo parece descartar practicamente

---

(12) TUBIANA, Op. cit., p 627

(13) Sin embargo el grupo tiol podría ser muy importante en relación con los puentes disulfuro de proteínas muy diversas, con lo cual la supuesta especificidad dejaría de ser tan evidente.

(14) "Existen también a nivel de la célula variaciones considerables de radiosensibilidad, según el fenómeno estudiado. Por ejemplo, 70 R reducen en 90 por 100 la actividad de mitosis de las células de la retina y mata 10 por 100 de dichas células en seis horas; en cambio, bastan 6 R para reducir en la misma proporción la frecuencia de mitosis de neuroblastos, pero es preciso alcanzar los 10 000 R para conseguir en estas últimas células una letalidad similar a la mencionada para la retina.." (TUBIANA, Op. cit., p 669).

la intervención de ácidos nucleicos en los resultados observados por nosostros. Con todo creemos conveniente mencionar un aspecto particular del "factor tiempo", indudablemente ligado con el efecto sobre ácidos nucleicos:

".....Algunos cálculos aproximados sencillos muestran que los fenómenos iniciales que intervienen en la absorción de las radiaciones son extraordinariamente rápidos. La velocidad de un electrón de 1 MeV es de 2.8×10^{10} cm por segundo; esto significa que recorre un diámetro atómico en un tiempo del orden de 10^{-18} segundo. Un electrón cuya energía sea solamente de 1 eV posee una velocidad de 1.8×10^{7} cm por segundo y este recorrido le tomará aproximadamente 10^{-15} segundo. Si la molécula recibe la energía aferente en un punto único, este exceso de energía se distribuirá por la totalidad de la estructura molecular mediante vibraciones, interatómicas. Puesto que la mayor parte de moléculas muestran bandas de absorción de vibraciones propias de la gama infrarroja (λ = 10 000 A), el tiempo que dura una de estas vibraciones es del orden 10^{-14} segundo. Vemos pues que al cabo de 10^{-13} segundo aproximadamente la energía se habrá distribuido por toda la molécula y que habrá tenido lugar una rápida disociación, si es que debe ocurrir. En algunos casos la disociación puede tardar hasta 10^{-7} segundo; pero este valor representa probablemente un límite extremo. Mediante algunas consideraciones adicionales, se puede concluir que todos los fenómenos iniciales ligados con la absorción de la radiación habrán llegado a su fin en menos de 10^{-4} segundo.

Uno de las aspectos más interesantes y más misteriosos del efecto de las radiaciones es el hecho de que un fenómeno primario que tarda 10^{-4} segundo en producirse puede

acarrear la muerte del animal 15 días más tarde, o la aparición de un cáncer radiógeno al cabo de 10 a 20 años"...(15)

Otros muchos autores destacan esta peculiaridad, así como la cantidad increiblemente pequeña de energía que interviene en estos fenómenos, de lo cual deducen que debe existir "un factor multiplicador". También en este caso es inmejorable la presentación de ANDREWS: (16)

".....Ya hemos mencionado la extraordinaria sensibilidad de los tejidos vivos a la irradiación; por ejemplo, la exposición del organismo en conjunto a una dosis de 1 000R significa casi seguramente la muerte para el hombre, en plazo de tres semanas tal vez. Esta dosis significa la transferencia a cada gramo de tejido de 8.7×10^4 ergios, que producirán un aumento de temperatura del orden de 0.002 grados centígrados. En un hombre promedio, la energía total absorbida sería pues de 6.1×10^9 ergios, lo que equivale a 140 calorías. En un gramo de tejido, encontramos aproximadamente 10^{23} átomos, y si aceptamos que se produce una ionización o excitación por cada 5 ev gastados, la dosis de 1 000 R sólo habrá afectado un átomo de cada 10^7. Esto equivale a decir que el efecto ejercido sobre 20 personas, hoy, tendría como resultado la desaparición de toda la población de los Estados Unidos de Norteamérica dentro de tres semanas; estos valores obligan a pensar en la existencia de algún tipo de amplificador biológico que aumente y extienda el fenómeno primario. Se han

---

(15) ANDREWS, Op. cit., p 221

(16) ANDREWS, Op. cit., p 287

propuesto varios mecanismos amplificadores, pero no se ha identificado con seguridad ninguno....." (17)

En el caso de la materia viva, o más precisamente en el caso de las soluciones acuosas diluídas de macromoléculas, existen dos hipótesis, elaboradas a partir de los hechos mencionados, y susceptibles, cada una, de explicar parte de las observaciones de este tipo; se habla de la teoría del "blanco", y del "efecto indirecto". Se pueden presentar como dos entidades separadas, aunque evidentemente no son sino dos aspectos de un mismo fenómeno. La "teoría del blanco", en dos palabras, supone que los electrones, o los fotones, o los electrones secundarios, o todos ellos, modifican las funciones biológicas alterando ciertos enlaces o grupos atómicos de determinadas moléculas específicas; por ejemplo, la rotura de un puente disulfuro en una deshidrogenasa, al entrar en colisión un electrón secundario con el átomo de azufre correspondiente, afectaría la fosforilación oxidativa en esta mitocondria (fig. 9). Muchas observaciones parecen apoyar esta hipótesis. La "teoría del efecto indirecto" considera que las interacciones más abundantes tendrían lugar con las moléculas que más abundan también, o sea, en iología, las de agua. Los productos de estas interacciones (principalmente radicales libres $H^{\bullet}$ y $OH^{\bullet}$; fig. 10) serían quienes actuarían sobre las macromoléculas de uno u otro tipo, ocasionando lesiones enzimáticas o

(17) Conviene recordar estas consideraciones cuando leemos estimaciones de la "potencia" de una bomba (en toneladas o millones de toneladas de TNT), o incluso de una planta atómica (en megawatts, etc.). Estas potencias "calóricas" corresponden a las 140 calorías que elevan la temperatura en dos milésimas de grado en el ejemplo de Andrews. El efecto "de vida o muerte" es incomparablemente mayor.

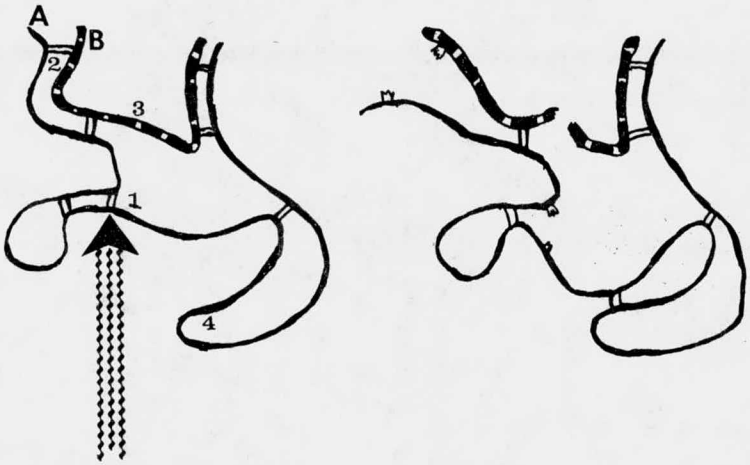


FIGURA 9 - En la teoría del blanco, el impacto del electrón o del fotón altera directamente el componente de la molécula que recibe el choque. Pero la energía absorbida por la molécula puede emigrar dentro de esta y producir cambios en diversos puntos especialmente "frágiles", así como un golpe en cualquier parte de una vasija fisurada hace que se rompa siguiendo la línea de fisura.

El esquema muestra una molécula de proteína (cadenas A y B, cuatro puentes intercatenarios y tres puentes en la cadena B). Un "impacto directo" en el punto 1 ocasiona: abertura directa de un puente intracatenario (1); abertura indirecta de un puente intercatenario (2); rotura indirecta de la cadena A en (3); y "puenteo" indirecto dentro de la cadena B (4). Estas alteraciones, u otras, pueden presentarse aisladas o en cualquier combinación. El esquema es completamente hipotético y no representa resultados experimentales.

cromosómicas "indirectas". También aquí hay un abundante cuerpo de observaciones a favor de esta hipótesis. En realidad ambos tipos de fenómenos son complementarios y simultáneos. Para no citar más que un hecho tendiente a demostrar esta simultaneidad, el "diámetro eficaz" (en otras palabras el "tamaño" de un supuesto blanco) varía con la radiación que se emplea, con la temperatura, y con otros factores (18).

---

(18) TUBIANA: Op. cit., p. 617

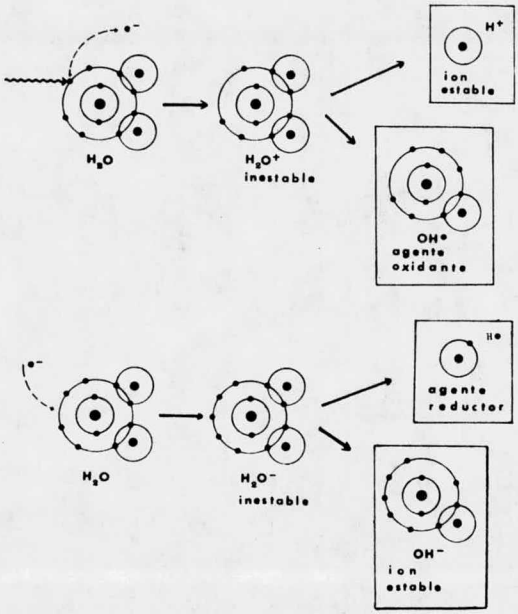


FIGURA 10 - Al perder o ganar un electrón, la molécula de agua se vuelve inestable, y se divide originando un ion estable y un radical libre H• u OH• de altísima reactividad química (el símbolo • indica que es impar el número de electrones en la capa externa del radical). Podría decirse que las radiaciones, además de ionizantes, son "radicalizantes".

Otro concepto muy importante es el L.E.T. ("Linear Energy Transfer" en inglés, o transferencia lineal de energía). Consiste en que la capacidad de un electrón, por ejemplo, para ceder su energía al medio que atraviesa, no es igual en cualquier punto de su trayectoria. Un electrón muy rápido recorre mucha distancia entre las "entregas" sucesivas de energía; progresivamente, su velocidad disminuye, precisamente por haber cedido energía antes, y la distancia entre cada "entrega" se hace menor; el efecto neto es que el electrón cede más facilmente su energía al final

de su trayectoria que al principio; en sú caso, produce una mayor densidad de ionización del medio en los últimos tramos de dicha trayectoria. Este efecto es uno de los pocos que resulta posible observar directamente, en la "cámara de niebla" donde ocurre un fenómeno similar al de la huella nebulosa que dejan los aviones en la alta atmósfera. La "cámara de niebla" contiene vapor de agua a baja presión, en cantidad suficientemente baja para que no estorbe el paso de las radiaciones ionizantes; estas, a su paso, originan cargas eléctricas que sirven de núcleos de condensación, y la niebla así creada se fotografía por efecto Tyndall (Fig. 11).

Un símil muy utilizado, con las virtudes y los defectos propios de los símiles, consiste en comparar los efectos producidos por las radiaciones con los de proyectiles de armas de fuego. A primera vista podría pensarse que el símil sólo es válido con referencia a la teoría del blanco, pero no es forzosamente así. En primer lugar, las distintas radiaciones equivaldrían a distintos proyectiles; hay balas pequeñas, medianas y grandes, hasta llegar a las de cañon. Y también las hay rápidas y las hay lentas, según la cantidad de pólvora que las impulsa. Cualquiera sabe que los efectos de una bala de 22 no son iguales a los de una bala de 45, tanto sobre materia viva como sobre materia inerte, y que a igual calibre, es más energético el proyectil más rápido. Otro aspecto del símil, quizá menos conocido fuera del gremio médico, es la analogía que existe con el fenómeno del L.E.T. Al ir disminuyendo la velocidad de un proyectil dentro de la sustancia que atraviesa, la proporción de su energía que cede al medio que lo rodea es cada vez mayor. En me-

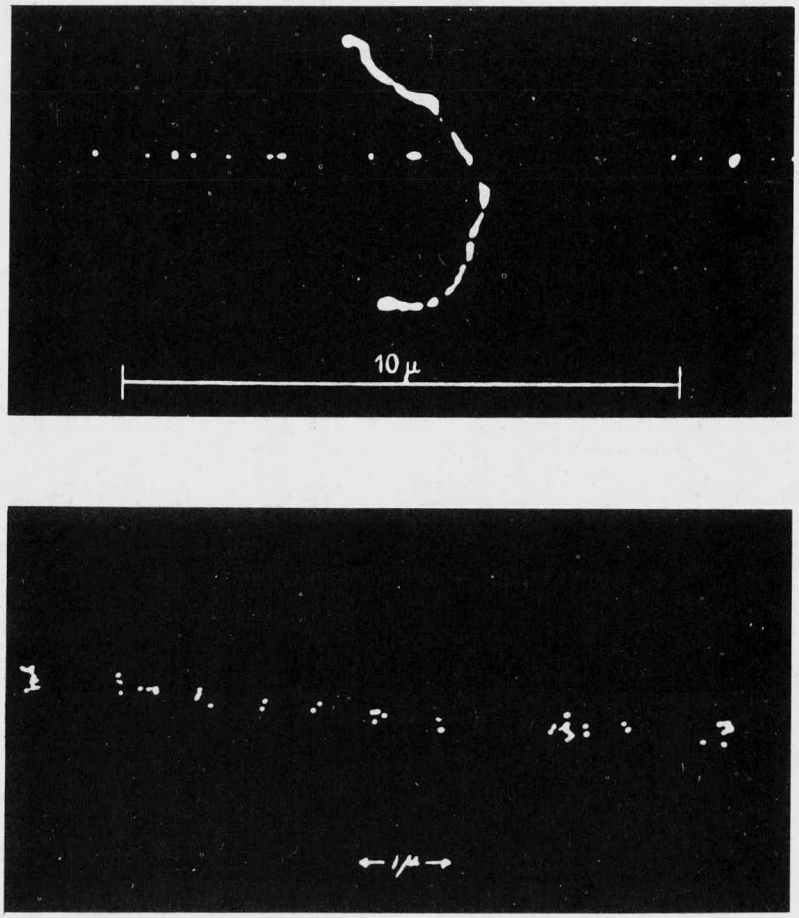


FIGURA 11 - Trayectorias de electrones en una cámara de Wilson o de niebla. Arriba, trayectoria horizontal de un electrón de 200 keV, y trayectoria vertical de un electrón de 20 keV, cuya densidad de ionización es netamente mayor. Abajo, trayectoria de un electrón de 1 MeV; se distinguen los racimos de ionización separados por intervalos del orden de 0.5 μ. (Según BACQ y ALEXANDER, en TUBIANA, M., DUTREIX, J., DUTREIX, A., y JOCKEY, P.: BASES PHYSIQUES DE LA RADIOTHERAPIE ET DE LA RADIOBIOLOGIE. Masson & Cie., Paris, 1963.)

dicina legal esto significa que los orificios de entrada de las heridas de bala son pequeños, a veces incluso difíciles de encontrar, en tanto que los orificios de salida son siempre muy grandes, con gran pérdida de sustancia. El "perfil" de la lesión producida es similar a la forma de la "nube" producida por un electrón en una cámara de niebla. En segundo lugar, tanto en las radiaciones como en los proyectiles de armas de fuego, es importante saber a qué se le dió. En un organismo, una herida de bala puede deber su importancia, no tanto al calibre del proyectil, sino al órgano afectado; asimismo, una radiación puede deber su eficacia en un momento dado al foco donde haya tenido lugar la absorción de energía. Dentro de una molécula, ciertos focos, o cadenas, o grupos químicos, son más frágiles que otros; dentro de una célula, ciertas enzimas o ciertos organelos son más esenciales; dentro de un órgano, hay grupos celulares de función más crítica que la de otros; en organismos complejos, una lesión pequeña en un órgano vital significa la muerte, a cambio de que puedan sustraerse grandes masas de tejidos no indispensables sin que perezca el individuo; y para seguir por éste camino, en los ejércitos, una sola bomba sobre el cuartel general puede tener un significado mayor que ocho días de bombardeo sobre las trincheras (eso es, en las guerras en que las había todavía). Se ve que aquí se pasa sin discontinuidad de los "proyectiles microscópicos" a las "bombas"; el denominador común, claro, es en todos estos casos un concepto de "blanco". Pero no es obligatorio darle a este blanco. Efectos indirectos también existen en el caso de los proyectiles. Para impedir el avance de una tropa, basta con que

los proyectiles maten a los caballos, o revienten los neumáticos de los camiones, o vuelvan intransitables las carreteras,o destruyan los puentes; la comparación, en este caso, es con el hecho de que la aparición de radicales libres en el agua de una solución biológica modificará el funcionamiento de las moléculas enzimáticas que contenga dicha solución. Tratándose de un símil sin mayores pretensiones que las propias, puede hablarse incluso del ruido de los disparos y del silbido de las balas; ambos tenderán, por efecto totalmente indirecto, a alejar el enemigo, a evitar que salga de donde está, enfín, a neutralizarlo tan eficazmente como si se hubiere matado; si se quiere, incluso a producirle infartos. Y en este juego se puede seguir haciendo comparaciones. Por ejemplo, el fenómeno de heterogenización de un haz de radiación, o la aparición de radiación secundaria, no deja de parecerse a los fenómenos de rebote y a la producción de astillas o de proyecciones (en los bombardeos la mayor parte de las heridas son producidas por estos proyectiles secundarios, no por los primarios). Incluso los efectos tardíos directos o indirectos, encuentran su paralelo: incendios que nacen después de un bombardeo, heridas que matan al sujeto quince días después, o que se infectan; vemos así que este símil, aunque fuera su sola virtud, se presta a llamar la atención hacia un esquema general de los efectos de las radiaciones sobre la sustancia viva. También permite aceptar intuitivamente que la distinción entre efecto indirecto y efecto directo es principalmente académica. Ambos ocurren simultaneamente y son practicamente inseparables.

ANTECEDENTES AL TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental que forma la parte central de la presente comunicación consistió en un intento para cuantificar las granulaciones intracelulares de leucocitos de sangre periférica de la rana. Para situar mejor dicho trabajo experimental, creemos necesario describir brevemente el conjunto de observaciones y experimentos en el cual se inscribe.

Nuestro punto de partida fue una observación presentada ulteriormente en el XIV Congreso de Ciencias Fisiológicas (19) en el sentido de que se alteraba la actividad eléctrica de la retina de gatos en cuyos senos frontales se implantaba un fino alambre de Cobalto 60 portador de una radiactividad sumamente baja. Existían, como en tantos casos, observaciones previas a la mencionada: Los astronautas habían referido en varias ocasiones percibir destellos de luz atribuibles a las radiaciones cósmicas (20), y aún antes de que la luna y el espacio quedaran al alcance del hombre, se había visto que una dosis de rayos X de un Roentgen era percibida por voluntarios mantenidos en la obscuridad (21).

---

(19) Ayala, F., Salgado, A., Fernández-Guardiola, A., y Marmasse, C.: EFECTO CRONICO DE DOSIS DEBILES DE RADIACION SOBRE LA VIA VISUAL DEL GATO. Instituto de Investigaciones Biomédicas y Facultad de Ciencias, UNAM. XIV CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS FISIOLOGICAS, OAXTEPEC, 1971.

(20) Nature (London), 1-VII-1971

(21) TUBIANA, Op. cit., p. 644

Sin embargo, la dosis de radiación gamma responsable del efecto descrito en dicha comunicación era mucho menor que las dosis propias de los casos referidos anteriormente. El resultado inmediato fue que esta observación se recibió con escepticismo, y el grupo de trabajo dentro del cual se efectuó el trabajo experimental que nos interesa decidió introducir esta variable, a saber una irradiación sumamente débil, dentro de la técnica experimental que estaba desarrollando, y que consistía en registros electrocardiográficos de rana (en animal entero o en corazón aislado) durante condiciones de normotermia y de hipotermia. El escepticismo antes mencionado se borró cuando quedó confirmado que las bajas dosis de radiaciones, todavía aplicadas en aquel caso mediante fuentes de Cobalto 60, producían modificaciones diversas, probablemente a nivel de membranas excitables o de sistemas enzimáticos relacionados con ellas, hasta resultados finales del tipo de los que presentamos en la figura 12 (22).

En los meses y años siguientes, se multiplicaron observaciones del mismo género, empleando preparaciones procedentes del mismo animal de experimentación. Los resultados fueron comunicados en congresos sucesivos de ciencias fisio-

---

(22) Folch, R., Marmasse, C., y Feria, V.: MODIFICACIONES DE LA ACTIVIDAD ELECTRICA DEL CORAZON DE RANA IRRADIADO IN SITU CON FUENTES GAMMA. Facultad de Medicina y Facultad de Ciencias, UNAM. XIV CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS FISIOLOGICAS, OAXTEPEC, 1971.

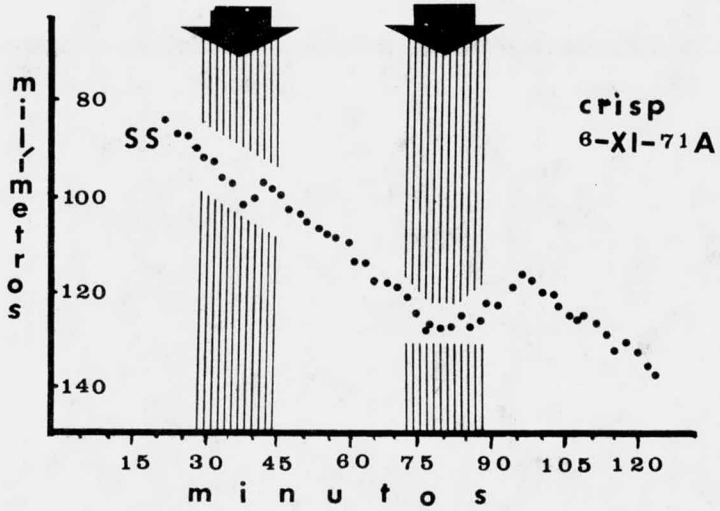


FIGURA 12 - Corazón de rana in situ (problema). El valor del intervalo SS (llamando onda S al accidente electrocardiográfico originado por la actividad del seno venoso) aumenta en forma regular y progresiva. Durante la aplicación de la radiación gamma (intervalo sombreado), se invierte esta tendencia. (OAXTEPEC, 1971.)

lógicas (23) (24). Casi siempre se trató de preparaciones in vitro, en un intento para delimitar a un solo órgano el efecto de la variable experimental. Con el intestino delgado de la rana, la radiación gamma provenía a veces de alambres de

---

(23) Hernández F., J., Rivas A., S., López R., F., Marmasse, C., y Folch, R.: ALTERACIONES DE LA ACTIVIDAD MECANICA DEL MUSCULO LISO IRRADIADO IN VITRO CON FUENTES GAMMA. Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, UNAM. XVIII CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS FISIOLOGICAS, SAN LUIS POTOSI, 1975.

(24) Hernández F., J., Barreiro B., S., Rivas A., S., Nehmad H., M., García J., S., y Folch F., R.: POSIBLE INTERVENCION DE UN FACTOR HUMORAL EN LAS MODIFICACIONES FUNCIONALES CONSECUTIVAS A IRRADIACION IN VITRO DE EPITELIO CILIAR Y MUSCULO LISO DE ESOFAGO CON FUENTES GAMMA DEBILES. Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, UNAM. XIX CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS FISIOLOGICAS, DURANGO, 1976.

Cobalto 60 introducidos en la luz de la víscera, y otras veces de una ampolleta que contenía una solución de una sal de Cesio 137 (figura 13). (25). En la serie más amplia, se es-

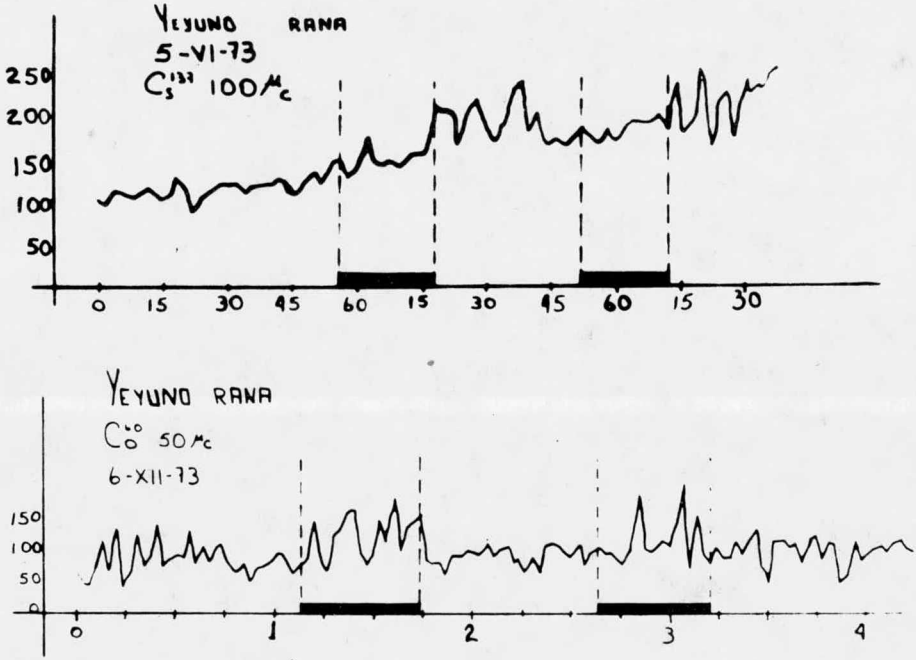


FIGURA 13 - Alteraciones del patrón de actividad mecánica del yeyuno aislado de la rana. En las ordenadas, unidades arbitrarias de amplitud de las contracciones, principalmente de fibras circulares. En las abscisas, tiempo en horas o en minutos. (SAN LUIS POTOSI, 1975.)

---

(25) Fuentes utilizadas: En corazón de rana, pastilla patrón, 9.5 μc.
En intestino de rana, alambres de cobalto 60, 5 y 50 μc.
En esófago de rana y eosinófilos, solución de cesio 137, 99 μc.

tudió la actividad mecánica de anillos del esófago de la rana (fig. 14). Con esta preparación se empezaron a estudiar las posibilidades de efectos directos e indirectos. Final-

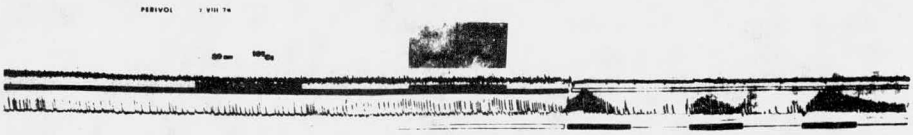


FIGURA 14 - Un registro de actividad mecánica de anillos de esófago de rana. El anillo que origina el registro superior (A) se irradia durante los dos períodos señalados con sombreado. No muestra alteraciones. Luego la solución de Ringer que bañaba este anillo se pasa al anillo que origina el registro inferior (B). Aumentan la frecuencia y la amplitud de las contracciones del anillo B. El efecto cesa al substituir esta solución irradiada por Ringer fresco, y se repite cada vez que se vuelve a poner el Ringer irradiado en contacto con el anillo B (continúa).

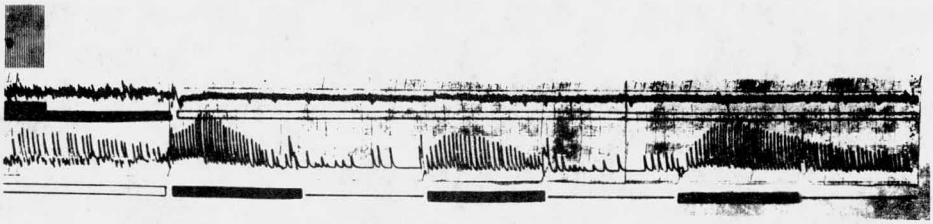


FIGURA 14 bis - Mayor acercamiento a la parte final de los registros presentados en la fotografía anterior (continúa).

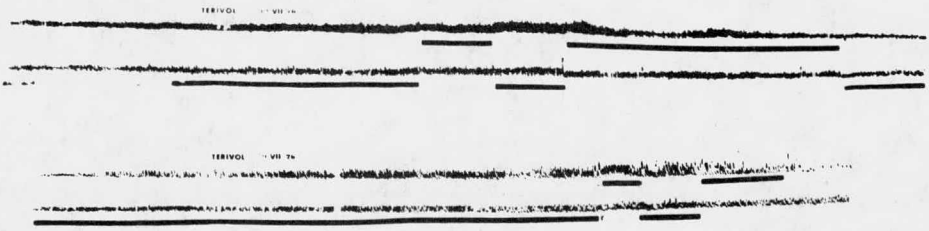


FIGURA 14 ter - En dos testigos, el intercambio entre anillos A y B de esófago de rana, de soluciones de Ringer sin irradiar, no modifica la actividad registrada. (DURANGO, 1976.)

mente los resultados más constantes se obtuvieron con la actividad mecánica del epitelio ciliado del esófago de la rana (figura 15, A-D). Otro grupo, tratando de revertir fenómenos de fatiga muscular mediante irradiación, no consiguió el objetivo apetecido.

Los diversos estudios tienen en común la aparición, en ciertos animales, de una indudable relación de causa a efecto entre la maniobra experimental y la modificación de los parámetros observados (frecuencia o amplitud de contracción, duración de intervalos, etc.); sin embargo, también tienen en común la dificultad o imposibilidad de predecir el resultado de un experimento particular. Tampoco se prestan a un análisis estadístico, por la relativa exiguidad de las series experimentales. En el caso de los efectos "reversibles" de dosis bajas, dicho análisis estadístico exigiría un material de estudio de una amplitud casi imposible de conseguir. Esta peculiaridad ha sido destacada también por Andrews (de quién citamos ya varios párrafos) cuando habla de la noción de umbral (26). Por cierto, viene a la mente otra vez la analogía en la cual hemos insistido, entre efecto de radiaciones y efecto de proyectiles de arma de fuego. En ambas situaciones son indudables los estragos producidos en los casos "positivos", y es no menos indudable la incertidumbre (si se nos permite) respecto a si habrá o no herida

---

(26) "Por desgracia, es muy difícil establecer experimentalmente si existe un umbral o no. Con las dosis bajas, los efectos de las radiaciones son tan pequeños que se precisan millones de animales de prueba para medir los daños producidos por una dosis de unos cuantos Roentgens. La población requerida para recoger una información estadisticamente significativa al emplear dosis de unos cuantos milirroentgens alcanza proporciones inverosímiles". (Andrews, Op. cit., p.301.)

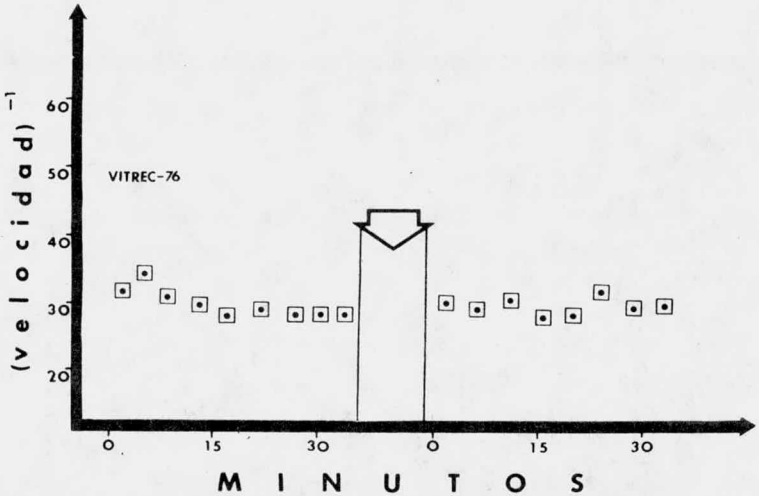


FIGURA 15 A - Actividad mecánica del epitelio ciliado del esófago de rana in vitro. Se mide a intervalos frecuentes el tiempo que requiere el transporte de una carga problema sobre una distancia fija (ordenadas). En toda la duración del experimento, esta velocidad de transporte permanece practicamente igual. Durante el intervalo señalado con una flecha blanca, no se efectuaron mediciones (continúa).

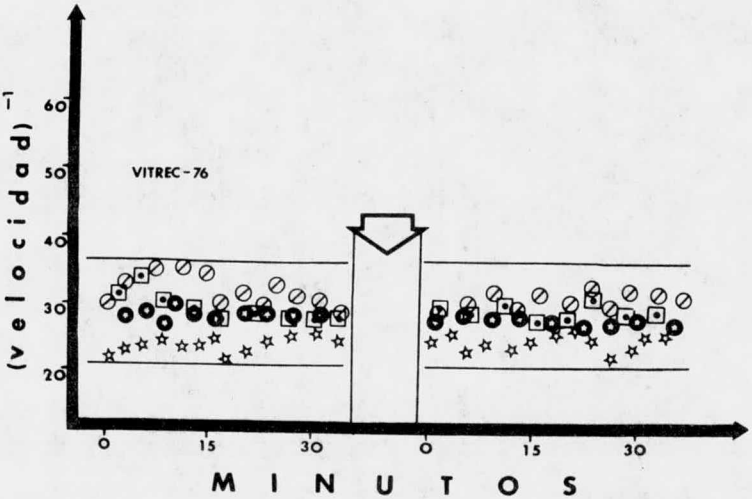


FIGURA 15 B - En cuatro animales diferentes, se comprueba la constancia de la velocidad de transporte. Esto permite establecer límites burdos de "velocidad normal", bajo forma de rayas horizontales (continúa).

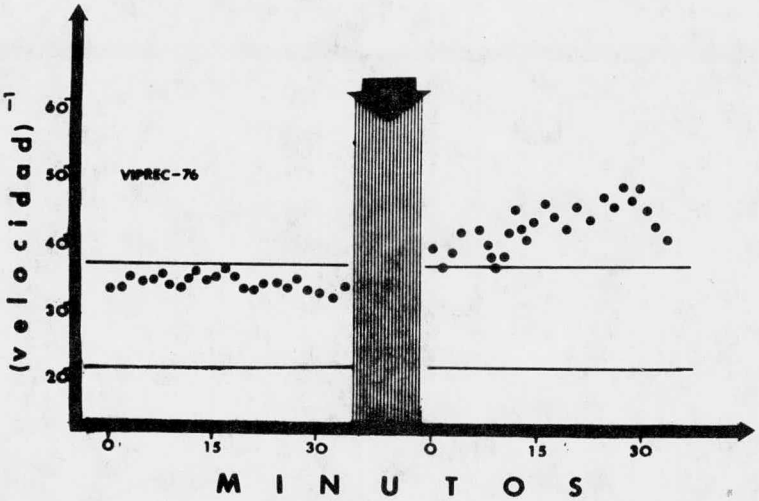


FIGURA 15 C - Se repite la manipulación con otro esófago, pero durante el intervalo señalado ahora con una flecha negra, se irradia el epitelio con una fuente de cesio 137. Después de la irradiación, el transporte es mucho más lento (continúa).

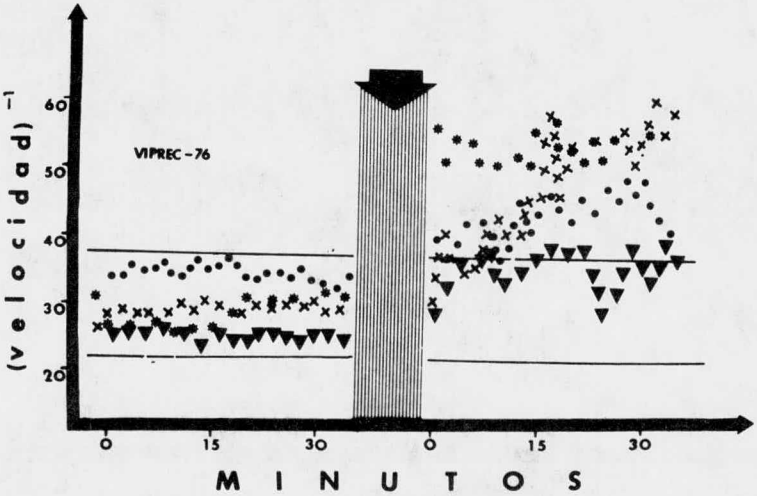


FIGURA 15 D - En cuatro experimentos iguales al anterior, la velocidad de transporte antes de la irradiación corresponde a lo que se señaló antes como "normal", y se altera considerablemente después. (DURANGO, 1976).

de bala en un combate; finalmente, tampoco cabe la "predicción estadística"; las estadísticas que pueda presentar un ejército en cuanto a pronóstico de bajas requieren un altísimo número de casos, al punto que ya no se trata de ninguna "muestra" sino de toda la población.

EXPERIMENTACION

Teniendo en cuenta esta multicitada similitud con lo que se puede llamar un "efecto proyectil", más el hecho de la amplificación energética presente en este caso como en todos los efectos de la irradiación (ver cita previa de Andrews 16), pensamos que valía la pena explorar la posibilidad de que algún organito intracelular constituyera el "blanco" de estas radiaciones. Un posible candidato sería alguna vesícula, que contuviera un mediador o una sustancia enzimática, de manera que la rotura en un punto único de la membrana limitante tuviese como resultado un efecto tan amplio como pudiera producir la totalidad del contenido de la vesícula. Así decidimos averiguar si se modificaba el número de granulaciones en los leucocitos de la rana. Esta elección se debió en parte a la relativa facilidad de observación de dichos organitos, ya que en un estudio preliminar nos convencimos de que la sangre de rana contenía muchos más eosinófilos que la de vertebrados superiores, y que las vesículas de dichos eosinófilos eran relativamente fáciles de contar, por su tamaño y distribución.

La literatura no alentaba mucho el intento, pues muchos autores habían señalado que hacían falta dosis muy altas para producir modificaciones morfológicas subcelulares

(27) o intracelulares (28). Sin embargo, estos resultados no eran totalmente homogéneos, y ya mencionamos anteriormente que una misma función enzimática (y por lo tanto quizá una misma morfología, pues no se trata sino de dos facetas de una misma realidad) puede requerir para su modificación dosis muy altas en un órgano, y muy bajas en otro (como en el caso ya citado de la fosforilación oxidativa en bazo y en hígado - 29). Paralelamente, una modificación morfológica podría ser muy difícil de obtener en ciertos tejidos, pero mucho menos en otros.

Elegimos la irradiación in vitro, como en los experimentos de otros integrantes del grupo, para evitar que una eventual respuesta a nivel del animal entero fuera a afectar el tejido estudiado. Con la misma idea general, buscamos evitar en lo posible todo contacto de las células problema con tubos de vidrio, para no dar lugar a efectos de superficie, y con anticoagulantes o con heparina, por temor a posibles interferencias bioquímicas. Se destruía el sistema nervioso de las ranas y se procedía a exponer las grandes venas y el seno venoso, en la parte posterior del corazón. Se colocaban dos ligaduras sobre las venas, la primera cerca del corazón y la segunda más lejos, obteniéndose así "sacos" o "bolsas" de vena en cuyo interior la sangre seguía en contacto con el endotelio normal. Esto permitía conservar esta sangre para irradiarla sin que se coagulara (pero con el inconveniente evidente de que la radiación estaba actuan-

(27) Goldfeder, Anna: Radiosensitivity at the subcellular level. Laval Med., Vol. 34, p. 12-43 (1963).

(28) Jolly, J., y Lacassagne, A.: De la résistance des leucocytes du sang vis à vis des rayons X. C. R. Soc. de Biol., 89, 379, 1923.

(29) TUBIANA, Op. cit., p. 642

do también sobre la pared de los vasos). Con cada animal se preparaban cuando menos dos sacos de este tipo, que se colocaban en sendas cajas de Petri en solución de Ringer. Uno de los sacos se irradiaba (exposición de 15 minutos a 100 μc. de Cs 137 (fig. 16), y el otro servía de testigo. Luego, se abrían los sacos y se preparaban con las sangres correspondientes dos frotis que se teñían por May-Grunwald-Giemsa.

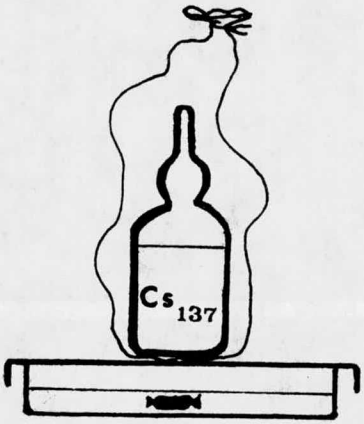


FIGURA 16 - Exposición de las bolsas venosas a la radiación gamma emitida por una solución de cesio 137 (véase el texto).

La observación se efectuaba con un microscopio AO, modelo de enseñanza, y las fotografías se tomaban con una cámara Pentax y una película de alto contraste, determinando la exposición por ensayo y error. Para contar las granulaciones de los eosinófilos, se proyectaban los negativos así obtenidos sobre un papel translúcido.

Adjuntamos algunas de las fotografías donde se aprecían de manera especial las granulaciones de los eosinófilos (fig. 17).

FIGURA 17 - (Página siguiente) - Los eosinófilos de la rana se prestan mucho mejor que los de mamíferos a una cuantificación de sus granulaciones citoplásmicas.

RESULTADOS

Presentamos un cuadro y un histograma de los resultados obtenidos (cuadro 3). No se aprecia ninguna disminución significativa del número de granulaciones a consecuencia de la irradiación (30). De hecho, en algunos casos se observa un aumento del número de granulaciones, lo que solamente habla de la dispersión de las cifras. El experimento estaba diseñado de manera tal que solamente un descenso en el número de granulaciones podía significar un efecto (31). Se puede modificar este diseño, y de hecho se piensa continuar el trabajo iniciado buscando nuevos parámetros de observación, como la capacidad fagocitaria, etc. Pero en esta serie, igual que en la fatiga muscular antes señalada, las dosis utilizadas no parecen haber modificado la situación inicial, aquí el número de granulaciones.

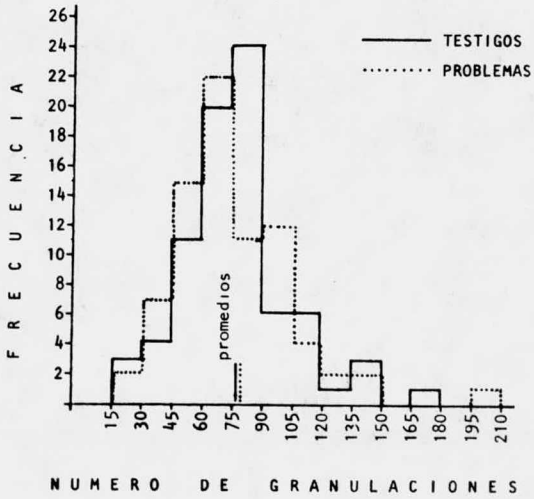
---

(30) Las cifras del último renglón del cuadro, $\frac{|m_T - m_P|}{\sigma}$, comparadas con los valores de la prueba de Student, confirman la identidad de las poblaciones "testigo" y "problema, que se nota además claramente en el histograma común.

(31) En el caso de los experimentos efectuados con músculo cardiaco, músculo liso o epitelio ciliado, tanto los aumentos como las disminuciones de frecuencia o de amplitud podían explicarse teoricamente por destrucción o modificación de un componente molecular o estructural. No es el caso en la serie aquí presentada.

	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX		TOTALES	
	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P
	82 77 87 63 82	31 84 51 65 73 53 96	89 86 114 68 70 174 89	83 70 101 103 68 134	83 108 75 83 69	61 70 67 104 64	80 73 40 83 82 58 77 68 103 28 59	48 45 42 56 78 74 81 60 49 81 57 104 53	84 100 48 106 64 69 63 75 105 82	92 62 130 81 73 65 87 148 65 62	84 81 58 99 85 73 82 99 127	96 98 143 61 70 70 104 68	55 109 73 92 110 88 81 89 147 112	85 89 119 109 209 104 103 143 106 92	65 59 40 26 83 60 51 144 78 75	40 52 65 79 191 27 49 58 64 53	29 64 43 53 66 45 59 67 56 73 68	57 34 81 74 46 46 43 36 106 75		
m	78	65	99	93	83	73	68	63	80	88	87	89	96	116	61	68	57	60	77	79
s	8	20	34	23	27	16	20	18	18	28	18	25	24	35	43	43	13	22	29	21
$\frac{\lvert m_T - m_P \rvert}{\sigma}$	1.42		0.31		0.66		0.56		0.61		0.11		1.43		0.35		0.38		0.37	

CUADRO 3.- Resultados de la experimentación sobre eosinófilos. I, II, etc., animales estudiados; T, testigos; P, problemas. Las cifras corresponden el número de granulaciones en cada célula.



DOSIS APLICADA - COMPARACION CON ESTUDIOS DIAGNOSTICOS COMUNES

Conviene ahora volver sobre nuestra afirmación previa en el sentido de que trabajamos con dosis muy inferiores a las que suelen utilizarse en radiología médica. Los cálculos aproximados que siguen corresponden a la experimentación sobre eosinófilos, pero casi pueden aplicarse sin cambios a toda la serie de trabajos previos.

Hemos utilizado una fuente constituida por una ampolleta que contenía una solución acuosa de Cs^{137}. La actividad de la ampolleta era de 100 microcuries en el momento de su preparación; una verificación efectuada en 1976 (32) mostró una disminución muy pequeña, como corresponde a un isótopo con una vida media del orden de 30 años.

Sabemos que hablar de curies o de microcuries sólo nos dice cuántas desintegraciones ocurren en cada segundo; no nos dice en qué consisten estas desintegraciones (o sea, qué radiaciones se emiten, y con qué energía - 33). Pero si sabemos además de qué isótopo se trata, ya es posible buscar en una serie de tablas un factor "k", también llamado débito de dosis, o constante de emisión gamma. Este factor "k", propio de cada isótopo, es la dosis de exposición, en Roentgen por hora, a 1.0 cm de una fuente puntiforme de un milicurie. Conociendo este factor "k", se acepta que la dosis total es igual a: i=kcg, donde k= Débito de dosis

c= Cantidad o actividad del isótopo.

g= Factor geométrico

(32) Por amabilidad del Dr. Gregorio Skromne, el 30 de Marzo de 1976, en el Hospital 20 de Noviembre del ISSSTE.

(33) Al respecto, véase el cuadro 4.

El "factor geométrico" depende de la forma de la fuente y de la forma del tejido, por una parte, y de la distancia entre la fuente y el tejido, por otra parte. Para la intervención de la distancia, se tiene una aproximación aceptable aplicando la ley del inverso del cuadrado de la distancia.

Para la fracción total del "factor g" que obedece a la geometría del sistema, suele seguirse un principio general que consiste en integrar alguna expresión para cuya obtención tanto el tejido como la fuente se reducen a una serie de elementos diferenciales. Todavía en relación con la geometría del sistema y con el "factor g", intervienen otros elementos como el acrecentamiento (34), la atenuación (35), y la autoabsorción (36); pero en el caso que nos ocupa, pueden desdeñarse estos fenómenos, puesto que el isótopo de Cs estaba disuelto en agua, y la radiación gamma sólo tenía que atravesar capas delgadas de agua y de aire.

---

(34) Se llama acrecentamiento (build up) el fenómeno por el cual el número de fotones (pero no la energía total) aumenta en las primeras capas del material irradiado, por aparición de fotones secundarios dirigidos hacia adelante. El factor de acrecentamiento depende de la energía de los fotones primarios, y de la naturaleza del material irradiado.

(35) Cualquier interacción de los fotones con el material irradiado (salvo el efecto Thomson) significa una mengua del flujo total de energía (véase también la figura 3). Para conocer la atenuación total, se compara la energía que tiene el haz al entrar al medio con la que le queda al salir de él. En el caso del agua, el coeficiente de atenuación, para fotones de una energía vecina de 0.6 MeV, como los emitidos por el Cs^{137}, es inferior a 0.001 por cada cm de recorrido; un trayecto de unos cuantos cm en agua practicamente no atenúa el haz.

(36) Se llama autoabsorción al fenómeno mediante el cual una fracción de los fotones emitidos por un radioisótopo no consigue salir de la fuente emisora (por ejemplo, los rayos gamma emitidos por el cobalto 60 contenido en una bomba de cobalto tienen que atravesar la propia fuente constituida por el cilindro de metal radiactivo; en este caso la autoabsorción puede llegar a 40 por 100. De nuevo, la autoabsorción en el caso del Cs^{137} disuelto en agua es practicamente inexistente.

En nuestros experimentos usamos 0.1 mc de cesio 137, cuya k es igual a (3.4 r/mc.h) (cuadro 4). En cuanto a gèometría, la relación entre la fuente y el tejido no es sencilla (véase el esquema de la fig. 17). Pero podemos alcanzar

CUADRO 4.- Características de algunos radionúclidos. (Modificado de TUBIANA, op. cit.)

Núclidos	*T*	E_β (MeV)	E_γ (MeV)	*k* (r/mc.h)
^{3}H	12 a.	0,018	0	0
^{7}Be	54,5 j	k	0,479	—
^{14}C	5 700 a.	0,155	0	0
^{22}Na	2,6 a.	0,54 1,8	1,28 (100 %)	11,9
^{24}Na	14,9 h.	1,39	1,38 2,76 (100 %) (100 %)	18,7
^{32}P	14,3 j.	1,71	0	0
^{35}S	87 j.	0,167	0	0
^{42}K	12 h.	3,6	1,51 (18 %)	1,4
^{45}Ca	164 j.	0,25	—	
^{51}Cr	28 j.	C. E.	0,325 (9 %)	—
^{55}Fe	2,6 a.	C. E.	—	—
^{59}Fe	45 j.	0,27 — 0,46	1,10 (57 %) 1,29 (43 %)	6,8
^{60}Co	5,2 a.	0,31	1,17 — 1,33 (100 %) (100 %)	13,1
^{64}Cu	13 h.	0,65 (+)	0,511 (38 %)	1,19
^{72}Ga	14,2 h.	0,54	0,83 (93 %)	—
^{76}As	26 h.	2,97	0,56 (45 %)	—
^{82}Br	36 h.	0,45	0,78 — 0,55 (90 %) (72 %)	15
^{89}Sr	51 j.	1,46	0	0
^{90}Sr	28 a.	0,545	0	0
^{131}I	8,04 j.	0,61	0,36 (80 %)	2,23
^{132}I	2,3 h.	1,5	0,67 — 0,96 (100 %) (23 %)	12
^{131}Cs	10 j.	k	—	—
^{134}Cs	2 a.	0,657	0,605 — 0,80 (100 %) (91 %)	—
^{135}Cs	$2,9.10^{6}$ a.	0,19	0	0
^{136}Cs	13 j.	0,35	0,9	
^{137}Cs	27 a.	0,514	0,662 (92 %)	3,4
^{190}Ir	12,6 j.	k	0,17 — 0,55	
^{192}Ir	74 j.	0,66	0,316 — 0,468 (100 %) (64 %)	5
^{198}Au	2,7 j.	0,96	0,41 (95 %)	2,32
^{210}Pb (Ra D)	25 a.	0,029	0,007 — 0,047	—
^{210}Po (Ra F)	138 j.	α		—
^{222}Rn	3,825 j.	α	—	—
^{226}Ra	1 620 a.	α + β	....	8,25
Th(nat.)....	$1,39.10^{10}$ a(^{232}Th)	α + β	....	—
U(nat.).....	$4,5.10^{9}$ a(^{238}U)	α + β	....	—
^{239}Pu	$2,4.10^{4}$ a	α		—

T = Vida media
E_β = Energía de los rayos β
E_γ = Energía de los rayos γ
k = Débito de dosis.

un orden de magnitud aceptable para la dosis buscada postulando un origen puntiforme, lo que significa que sólo intervendrá el inverso del cuadrado de la distancia, y usando como dicha distancia un valor "promedio" del orden de 5 cm. Con estos datos y recordando que en esta serie la irradiación duró generalmente 15 minutos, podemos escribir:

$$i=kcg = 3.4 \times \frac{1}{4} \times 0.1 \times (\frac{1}{5})^2 = 3.4 \times 0.1 \times \frac{1}{(5)}2 \times \frac{15}{60}$$
$$= 4 \text{ mR}$$

Nos conformaremos con este valor aproximado, sin mencionar siquiera que como el valor del LET o TEL promedio derivado de la trayectoria de los electrones secundarios a la radiación gamma del Cs^{137} es muy bajo en un tejido vivo, la dosis absorbida (en mRads) es seguramente muy inferior a esta dosis de exposición en mRoentgen. Aún así, es interesante comparar esta dosis de 4 mR con las dosis, calculadas o medidas, que caracterizan determinadas aplicaciones clínicas(37).

Es frecuente que la literatura mencione la "dosis gónadas", o sea la dosis a la que están expuestos los testículos o los ovarios, por razones fáciles de comprender y que volveremos a mencionar. Estas dosis gónadas son del siguien-

---

(37) Nos referimos a estudios diagnósticos; evidentemente, no tratamos aquí de la terapéutica por irradiación, que utiliza siempre dosis muy altas, puesto que precisamente busca destruir los tejidos enfermos.

Estos estudios diagnósticos forman parte de las irradiaciones artificiales, de origen humano. La irradiación natural de distintos orígenes (rayos cósmicos, isótopos radiactivos en las rocas o en los materiales de construcción procedentes de estas rocas, gases radiactivos en la atmósfera, isótopos ingeridos con los alimentos, etc.) da en promedio una irradiación total que se puede estimar en 100 a 150 mR al año.

Existen también irradiaciones artificiales de origen humano, pero no médicas: televisión, relojes luminosos, vuelos a gran altura, y sobre todo la complicada serie de explosiones atómicas.

te orden, en mR (en cada ocasión se mencionan dos cifras, de las cuáles la primera corresponde a la gónada masculina, y la segunda a la femenina): radiografía simple de tórax, 0.2--0.45; radiografías de estómago, 90-300; radiografías de columna lumbar, 250-750; estudios de colon por enema, 135-265; urografía, 390-4500 (38).

En el caso de la médula osea (evidentemente aquí no hay diferencia según el sexo), la radiografía de tórax representa 40 mR, y una serie de tubo digestivo, de 500 a 700 mR. Estas cifras corresponden a un sólo estudio diagnóstico radiológico; no es raro que un mismo enfermo se someta varias veces a cualquiera de estos estudios (39).

Una histerosalpingografía equivale a una dosis del orden de 1 Roentgen (40). Ya no en los pacientes, sino en los radiólogos, se calculan dosis de 0.1 a 30 mR en cada estudio (41). Para los operarios de instalaciones radiactivas, la dosis actualmente "permitida" por la ley en los Estados Unidos de Norteamérica es de 0.25 Rads, en una semana de 40 horas, sin pasar de 6 mR por hora (42). La lista es inacaba-

---

(38) Las cifras mencionadas provienen de TUBIANA, Op. cit., p. 734. Otros autores dan valores ligeramente distintos, aunque dentro del mismo orden de magnitud. Véanse los cuadros 5 y 6.

(39) Por desgracia, muchas veces, además del paciente, quedan expuestos a la irradiación, aunque sin saberlo, los vecinos del radiólogo, cuando la instalación no es irreprochable.

(40) Shirley, Robert L.: Ovarian radiation dosage during hysterosalpingography. Fertil. Steril., 22(2), 83-85 (1971).

(41) Rytila, A., y Perttala, Y.: Average dose to the radiologist in contrast media studies of the gastrointestinal tract, lower extremity venography and uretrocistography. Health Phys., 18(2), 123-125 (1970).

(42) Jammet, H., y Nenot, J-C.: Département de protection du C. E. A. Science et Vie, H.S. 117, 1977.

ble, y nos está llevando progresivamente a otros dominios y problemas. Antes de concluirla, una cifra más, verdaderamente escalofriante, recogida en un estudio de gabinetes de dentistas del condado de Nassau en el estado de Nueva York: en dicho estudio se citan cifras de 750 mR por cada placa (15 veces más que una radioscopía) y para un estudio radiográfico de boca entera, una dosis total de ¡ 2 a 130 Roentgens! a nivel de piel (43).

Los datos antes citados, y otros muchos, nos permiten pues afirmar que en toda la experimentación presentada, y en particular la relacionada con granulocitos, se aplicaron dosis al menos 10 a 20 veces inferiores a las que se acostumbran en radiología diagnóstica.

---

(43) Pentel, L., y col.: A survey of dental X-ray equipment and radiological practices in Nassau County, New York. Health Physics, 20 (1), 59-70, 1971.

CUADRO 5.- Dosis promedio correspondientes a diversos exámenes radiográficos, en mRads.*

EXAMEN	PIEL	MEDULA OSEA	GONADA masculina	GONADA femenina
Serie gastroduodenal	1 700	530	20	80
Colon por enema	1 400	650	150	600
Tórax	150	10	1.5	5
Columna lumbar	1 500	220	200	400
Pielografía excretora	1 700	130	600	600
Pielografía ascendente	1 400	—	800	1 000
Abdomen	1 400	100	190	180
Abdomen (obstétrico)	3 800	170 (feto 500)		400 (feto 700)
Pelvimetría	10 000	230 (feto 1 100)		860 (feto 2 000)
Colecistografía	1 500	—	4	60

CUADRO 6.- Dosis promedio aplicadas durante algunas pruebas a base de isótopos radiactivos.*

PRUEBA	ISOTOPO EMPLEADO	DOSIS TOTAL EN MRAD DURANTE LA PRUEBA
Agua corporal total	H^3	200
Líquido extracelular: sodio intercambiable	Na^{24}	50
Líquido extracelular: agua intercambiable	S^{35}	1 000
Función tiroidea	I^{131}	38 000
Volumen plasmático (por HSA o PVP)	I^{131}	750
Serotonina	C^{14}	20
Volumen sanguíneo	Cr^{51}	60-240
Absorción de hierro	Fe^{55}	750
Localización de tumores óseos	P^{32}	5 100
Función renal (neohidrina)	Hg^{203}	10 000

* Los cuadros 5 y 6 fueron elaborados con datos de Osborn, S.B., y Ellis, R.E., in ETTER, Op. cit., cap. 29.

CONCLUSIONES

Al terminar, debemos asentar algunas conclusiones. Nuestra experimentación no ha traído hechos nuevos, pero nos ha permitido familiarizarnos con parte de la abundante literatura. Como se señaló al principio, no podemos dejar de opinar acerca de si debemos o no utilizar las radiaciones, o más claramente, si debemos o no recurrir a la energía atómica.

Nadie niega que las radiaciones sean peligrosas. Lo atestiguan la muerte anónima en Hiroshima, y las muertes célebres, de Marie Curie por radioleucemia y de su hija Irene Joliot 20 años más tarde, por radioleucemia. Pero nadie puede negar tampoco que sean peligrosos la dinamita o el motor de combustión interna. La pólvora y el automóvil han matado mil veces más que el átomo. Es verdad que cualquier decisión implica comparar ventajas con inconvenientes. Si las ventajas de la energía atómica sobrepasan sus inconvenientes, si esta relación $\frac{V}{I}$ es muy alta, la decisión debe ser: adelante. Este razonamiento lógico se transforma en grosero error o en simple mentira si no se dice que las ventajas buscadas pueden seguirse de otra manera, sin recurrir a la energía atómica y sobre todo que los inconvenientes o peligros confrontados difieren en forma absoluta de todo lo que el hombre conoció hasta ahora.

La dinamita y el automóvil, las fieras, la peste, el frío y el hambre, pueden acabar con uno, diez, mil individuos y sus familias, borrar 90 por 100 de una población, dejar cicatrices y lisiados; pero nunca tocaron las descen-

dencias, nunca modificaron los epitelios germinativos. Causan daños a veces terribles, pero siempre "horizontales". Ahora estamos frente a un peligro "vertical", ejercido en el tiempo. Paradojicamente, este peligro es mayor con las dosis bajas, pues las dosis altas, que llegan a matar a un individuo, implican suprimir una descendencia, como lo haría una neumonía, mientras que las dosis bajas pueden alterar esta descendencia en forma definitiva.

Hace ya más de 50 años que Muller demostró por primera vez que las radiaciones aumentan el número de mutaciones (44). Se sabe que para ello no es necesario producir aberraciones cromosómicas (cuyo efecto requiere dosis relativamente altas; además, en este caso, la regla es que el individuo portador de esta aberración no sobreviva, con lo cual deja de transmitir la anomalía), sino que bastan las mutaciones puntiformes sobre un gen o unos cuantos genes para que aparezca la anomalía funcional, a veces a varias generaciones de distancia, cuando las mutaciones producidas son recesivas (45).

---

(44) En la serie de estudios de que forma parte el trabajo sobre eosinófilos, todo parece indicar que los eventuales efectos afectaron el citoplasma, o el agua del citoplasma o del baño; muchas veces, los efectos de dosis bajas sobre citoplasma y enzimas son reversibles, precisamente porque la cromatina sigue funcionando bien y repone las sustancias destruidas o alteradas. Pero cuando están afectados los genes mismos, todas las funciones que de ellos dependen se modifican.

El fenómeno de reconstitución de la cromatina, sin ser completamente imposible, practicamente no existe. Además, la irradiación exclusiva del citoplasma también puede desembocar (por efecto indirecto) en anomalías de la cromatina nuclear. Enfín, no debe olvidarse la existencia del material genético citoplásmico.

(45) ¿Podría hablarse de lisogenia postirradiación?

Es cierto que las mutaciones no son un fenómeno nuevo; la radiactividad natural, sin ir más lejos, parece ocasionar mutaciones a razón de una por cada 50 000 genes. Tampoco es nuevo el aumento de las mutaciones por causas humanas; lo produce el LSD, y con él una larga lista de cuerpos químicos. Pero estos argumentos pierden toda validez cuando vemos una de las causas de estas irradiaciones y de estas mutaciones, a saber la energía atómica, ser objeto de una industria cada vez más activa y un comercio cada vez más intenso.

Es preocupante ver cómo, en el mundo entero, una ciencia y una técnica susceptibles de traer tantos beneficios, corren el riesgo de escapar al control de los hombres bien intencionados, para caer en manos de quienes, por ignorancia o falta de escrúpulos, harían correr a la humanidad peligros sin precedentes. Esta preocupación estuvo presente en todo momento de la serie experimental de que forma parte la presente tesis, y nos moverá a continuar estos estudios.