

# EL EMPLEO DE FUENTES DE RADIACION DE ELEVADA INTENSIDAD Y SUS PERSPECTIVAS

Por el Dr. Henry Seligman \*

El tema de mi charla es muy amplio y abarca gran número de disciplinas científicas; es un tema que no cabe dominar por completo y por eso me limitaré a explicarles por qué las grandes fuentes de radiación han pasado al primer plano de la actualidad científica, en qué consisten, qué relación guardan con la energía atómica, qué cantidad de energía nos pueden dar y, sobre todo, cómo se las utiliza en las diferentes esferas. Luego les daré mi opinión personal sobre su evolución futura y sobre los beneficios que pueden reportarnos.

Para empezar, unas cuantas palabras acerca de la energía de las radiaciones. Hablamos de que se están instalando millares de megavatios de potencia nuclear y sabemos que por cada 1 000 MW de capacidad eléctrica instalada heredamos cada año 3,3 megacuries de cesio-137 y la misma cantidad de estroncio-90. Esto supone ya una cifra considerable porque la capacidad eléctrica instalada asciende a millares de megavatios, lo cual significa que hemos acumulado millones y millones de curies de cesio y de estroncio que reposan en estanques y almacenes de depósito. La primera razón que motivó el empleo de fuentes de radiación de gran intensidad fue, simplemente, el hecho de que se produjera tanto material radiactivo. Al mismo tiempo, ha tenido lugar una evolución paralela en la industria eléctrica. Durante la guerra y después de ella, esta industria ha conseguido grandes progresos en la construcción de máquinas que, como los aceleradores lineales y los Van de Graaff, se pueden emplear también para irradiaciones masivas.

Reseñemos rápidamente las fuentes de que disponemos para la irradiación. Las más baratas son, sin duda alguna, los «elementos combustibles utilizados» que se extraen del reactor; éstas son las primeras fuentes a que recurren los centros nucleares que necesitan fuentes de radiación intensa para sus trabajos. Para hacerse una idea de lo elevada que es su intensidad, examinemos un buen reactor de investigaciones como el DIDO o el PLUTO. Cada elemento combustible posee aproximadamente 100 000 curies en el momento de extraerlo del reactor. Si agrupamos seis de estos elementos en torno a un tubo de 90 cm de diámetro, podemos obtener nada menos que seis millones de rads \*\* por hora. Esta es ya una dosis masiva que puede aplicarse en un período razonable de tiempo. Claro que hay inconvenientes: por ejemplo, las fuentes están dentro del recinto del centro nuclear y no todo el

\* El Dr. Seligman, Director General Adjunto del Departamento de Investigaciones e Isótopos del OIEA, pronunció esta conferencia en Viena en noviembre de 1964.

\*\* El rad es la unidad básica de dosis de radiación absorbida.

mundo quiere que se haga allí la irradiación. Otra desventaja estriba en que en estos conjuntos de barras de combustible la intensidad de dosis no es la misma y alcanza valores mucho más elevados en el centro que en la parte exterior. Esto se puede corregir variando la posición de los elementos combustibles hasta obtener una intensidad uniforme. Así tenemos una fuente barata y fácil de obtener pero cuyo empleo puede resultar poco práctico.

Si se utiliza este tipo de fuente conviene tener cuidado con los neutrones, ya que el lantano-140 tiene una energía gamma bastante elevada y un 6 por ciento aproximadamente de ella excede del valor a partir del cual se produce la interacción con el deuterio del agua, lo que puede provocar una radiactividad inducida.

Otras fuentes de radiación son los gases de fisión. El xenón-133 es uno de ellos. Como el xenón es un veneno eficaz que absorbe muchos neutrones, hay que eliminarlo del reactor. Cuando se diseñó el reactor Dragon se pensó bombear los productos de fisión durante el funcionamiento en fijar por adsorción los gases de fisión extraídos en carbón, por ejemplo, para obtener así una fuente de radiación económica y muy potente. Pero luego se descartó esta posibilidad y se prefirió modificar el diseño.

## RADIACIONES BARATAS

Otra posibilidad consiste en aprovechar los circuitos de los reactores. Algunos reactores usan como refrigerante una aleación de sodio y potasio que absorbe gran cantidad de neutrones y se hace muy radiactiva. Esa mezcla se puede utilizar luego fuera del reactor como fuente de radiación eficaz. Un procedimiento similar se ha ensayado en los Estados Unidos utilizando sales de indio. Estas sales - el indio es también un poderoso absorbente de neutrones - se hacen circular a través del reactor y después se utilizan las energías gamma resultantes. Para darles una idea de los resultados obtenidos les diré que en el reactor de Hallam y utilizando sodio como refrigerante se obtienen dosis de radiación de  $2 \times 10^5$  roentgen por hora. En términos monetarios esta radiación sale muy barata: 1,2 centavos de dólar por libra y por megarrad. Como verán ustedes, estas fuentes resultan económicas; lo único que hace falta es poder transportar el material que ha de irradiarse al emplazamiento del reactor.

Como ya he dicho antes, las fuentes más potentes que aún siguen sin aprovechar son algunos de los productos de fisión de período largo: el cesio-137, el estroncio-90 y otros. Algunos países han construido plantas para extraerlos; desgraciadamente ese proceso no es muy barato, aunque resulta más económico a medida que se hace en mayor escala. Es decir que si se pudiera separar un millón de curies de estroncio y de cesio al mismo tiempo - estos dos elementos tienen casi el mismo rendimiento de fisión - podrían obtenerse radiaciones muy económicas, como puede verse con un sencillo cálculo: una planta química que funcione durante diez años tiene un gasto de uno a tres millones de dólares; si cada año produce 100 millones de curies de cesio y de estroncio, cada curie costará una pequeña fracción de

dólar, tal vez incluso menos de un centavo. Claro que los gastos no se refieren sólo a la planta sino también al encapsulado de las fuentes, operación que resulta muy costosa. Por otra parte, el costo de una fuente debe compararse con el del competidor principal, que es en la actualidad el cobalto-60.

Aunque el período del cobalto es cuatro veces más breve que el del cesio, su radiación gamma es mucho más intensa, por lo que habría que utilizar cuatro veces más cesio para igualar la potencia de radiación del cobalto. El cobalto-60 se produce en muchos y muy diversos reactores, y depende del flujo del reactor. Se pueden fabricar fuentes de cobalto de actividades muy diversas - de dos a varios centenares de curies por gramo - y las más intensas se destinan a usos médicos, para los que se requieren fuentes sumamente concentradas. Las fuentes de cobalto son fáciles de manejar y se pueden utilizar para toda una serie de aplicaciones.

Volviendo a las instalaciones de irradiación les diré que las celdas de irradiación a base de elementos combustibles ya utilizados son relativamente sencillas, por muy numerosos que sean los dispositivos de seguridad necesarios. Una de las primeras plantas de ensayo utilizaba barras que contenían cobalto, las cuales podían colocarse como uno quisiera; podíamos separarlas para obtener mayor volumen de irradiación y reducir la dosis, y viceversa.

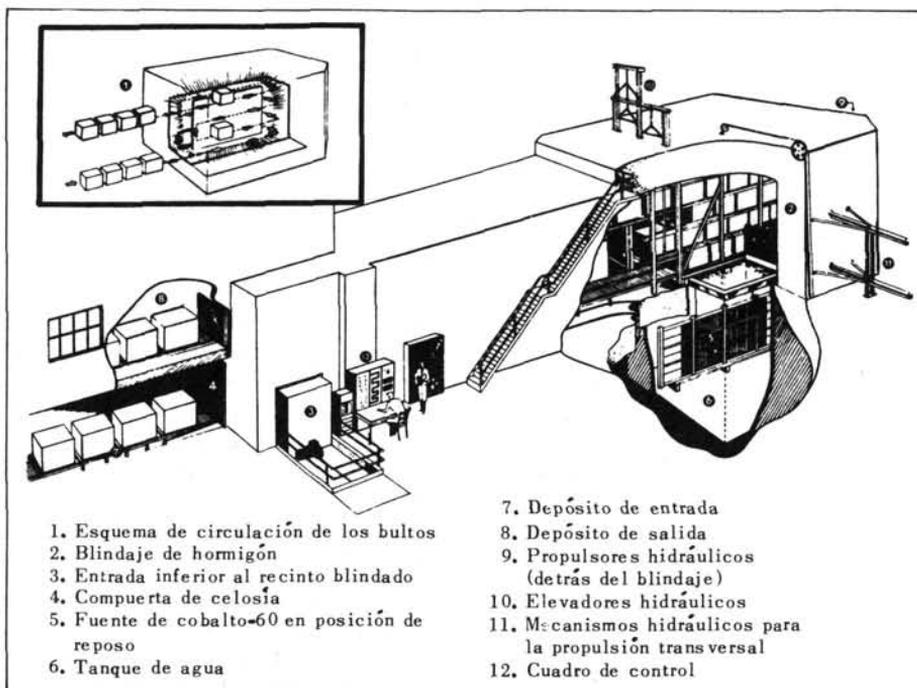
## IRRADIADORES DE ELEVADA INTENSIDAD

El empleo del cobalto se ha desarrollado con la construcción de numerosas plantas de irradiación en diversos lugares del mundo. Los aparatos necesarios para guiar al material irradiado a través de la planta son tantos y tan complicados que viéndolos uno casi se olvida del propio cobalto. El verdadero problema consiste en aprovechar al máximo las radiaciones que se emiten durante las 24 horas del día; esto significa que todos los materiales necesarios para la irradiación han de manejarse dentro de la planta. A las plantas de nueva construcción se les dota de un grado de automatismo cada vez mayor, lo cual redundará en un aumento de su costo; el costo del cobalto cuenta ya mucho menos, pues la partida principal de gastos es ahora la planta con todos sus sistemas de seguridad y mecánicos.

La primera planta destinada al empleo de cobalto como fuente de radiación se construyó en Australia; su finalidad era esterilizar el pelo de cabra empleado en la fabricación de alfombras, para precaverse contra el envenenamiento por ántrax. Esta planta empleaba más de medio millón de curies de cobalto-60 y últimamente se ha utilizado también para irradiar material médico y para otros fines.

Ahora bien, no quiero hablar de todos los materiales que se pueden irradiar; lo que quiero es explicarles el desarrollo de las fuentes de radiación de elevada intensidad y sus grandes posibilidades.

Que yo sepa, el irradiador más potente que existe se halla en los Estados Unidos, se usa para la irradiación de alimentos y posee una fuente de 1,3 megacuries. El Departamento estadounidense de Alimentos y Drogas ha



Planta industrial de irradiación gamma que viene funcionando en Australia desde 1960: diseño general de la planta y esquema de circulación de los bultos

autorizado la venta de diversos productos alimenticios de consumo después de haberlos irradiado ateniéndose a dosis máximas prefijadas.

En el Reino Unido hay otras plantas de este tipo: una en Edimburgo y otra en Inglaterra meridional, que se usan también para tratar material médico. Pero también hay diversas máquinas eléctricas, cuyo empleo presenta ventajas e inconvenientes: por ejemplo, es posible concentrar en un volumen reducido una dosis de radiación muy elevada durante un breve período de tiempo, pero las máquinas eléctricas como las Van de Graaff tienen una desventaja y es que exigen una tensión elevada, lo que aumenta los riesgos de interrupción. Más tarde se empezaron a utilizar aceleradores -sobre todos los lineales - cuyas energías oscilaban dentro de un margen de varios MeV (de cuatro a 25 MeV). Los aceleradores empleados para estos fines suelen ser de hasta 30 kW. En una planta de irradiación a base de aceleradores se tropieza con un problema aún más grave que en una planta de cobalto y es el de impulsar a todas las cajas (o a los recipientes de que se trate) a través del haz de irradiación, que suele ser muy estrecho.

La última novedad en esta esfera es el dinamitrón. Su principal ventaja es que no tiene gran capacidad (es decir, no acumula gran cantidad de energía) por lo que las probabilidades de interrupción son mucho menores. Los fabricantes sostienen que el dinamitrón merece mayor confianza que las

demás máquinas. También se construye para energías de uno a 13 MeV, y su potencia suele ser de 30 a 100 kW.

## LAS RADIACIONES Y LA QUIMICA

Esto por lo que se refiere a los diferentes irradiadores de que se dispone en la actualidad. Pasemos ahora al tema principal, la esfera en que las radiaciones se utilizan o se pueden utilizar con provecho, es decir, la química.

El impacto de las radiaciones modifica con frecuencia los compuestos químicos; por lo tanto, hay que investigar muy a fondo esta esfera antes de que nazca - si es que nace - una nueva industria que llamaremos química de las radiaciones. Los primeros compuestos que se investigaron fueron los polímeros, que por poseer las mayores moléculas son los que más interesantes perspectivas ofrecen en caso de irradiación. Los primeros que se investigaron fueron los polietilenos. Lo que sucede irradiando estas moléculas en cadena es que se estimulan los procesos de enlace y de reticulado, con lo que se obtienen moléculas aún mayores con propiedades físicas totalmente distintas (por ejemplo, con diferente flexibilidad o con diferente punto de fusión). Los objetos de polietileno irradiados pueden resistir temperaturas de 120°C, mientras que los objetos sin irradiar, no. El polietileno utilizado para los cartuchos de tinta de los bolígrafos se suele irradiar para impedir que se resquebrajen por la acción del disolvente contenido en la tinta. Mucha gente lleva objetos irradiados en el bolsillo sin saberlo.

El segundo ejemplo, no menos interesante y de uso corriente, es el denominado «efecto de memoria». El polietileno irradiado se puede moldear y enfriar; si luego se recalienta hasta cierta temperatura, vuelve a recobrar su forma primitiva. El polietileno se utiliza también como envoltura; si se desea envolver algo de forma que quede muy prieto se puede aprovechar el «efecto de memoria» para ajustar perfectamente la envoltura al producto. Si se usa un hermoso plástico transparente se obtendrá un paquete muy ajustado y atractivo; sin duda han visto ustedes algunos géneros con esta envoltura y se habrán preguntado cómo se ha conseguido presentarlos tan bien.

Ahora vamos a hablar de algo que pude llegar a tener una importancia incalculable: me refiero a los elastómeros. Los elastómeros son cauchos de moléculas reticuladas. La vulcanización del caucho es una operación muy delicada porque exige el empleo de azufre. La razón principal de que tengamos que cambiar los neumáticos tan a menudo es porque contienen azufre, y hace ya mucho tiempo que se piensa en vulcanizarlos por irradiación. Pero la dosis necesaria era enorme: unos 10 megarads. En aquella época, entre 1957 y 1958, llegamos incluso a calcular el coste de un reactor destinado exclusivamente a la vulcanización de neumáticos, para ver si era interesante construir un reactor con este único objeto. Resultó que costaría demasiado, pero desde entonces ha habido muchas novedades. Por ejemplo, añadiendo determinadas sustancias cabe reducir la dosis de irradiación necesaria de unos 10 millones de roentgen a 1 millón de roentgen; todo esto, naturalmente, si las sustancias que se añaden no causan mayor daño al neumático que el azufre que se está tratando de eliminar por este procedimiento.

## VULCANIZACION CON RADIACIONES

Esto puede darles un ejemplo de las perspectivas que ofrece el empleo de las radiaciones. Es verdad que en muchos casos su empleo no resulta aún rentable - así sucede con la mayor parte de sus aplicaciones - pero puede serlo cuando se introduzcan determinados aditivos en algunos de estos complicados sistemas químicos, con objeto de reducir las dosis de radiación necesarias sin renunciar a los efectos apetecidos. Lo malo es que a menudo resulta difícil prever qué efectos tendrá el uso de los aditivos.

Los trabajos publicados sobre el particular hablan muy poco de la vulcanización, y esto es una buena señal. En efecto, este silencio significa que se está trabajando muy en serio sobre este proyecto y que las compañías guardan el secreto. Cuando uno encuentra una multitud de artículos acerca de los resultados de la irradiación del agua, por ejemplo, esto quiere decir que se trata de un tema de poco interés para la industria. Convendría leer regularmente los artículos y publicaciones para ver lo que falta en ellos, pues seguramente será lo más interesante. Las publicaciones hablan ahora muy poco del caucho, probablemente porque se debe de estar trabajando en algún sistema competitivo que permite reducir todavía más la dosis de irradiación necesaria para la vulcanización. No me extrañaría nada que dentro de unos años pudiésemos encontrar en el comercio neumáticos de caucho vulcanizados por irradiación y no con azufre, lo que supondría una duración de 2 a 10 veces superior a la de los que usamos ahora. Esto constituiría un enorme campo de aplicación para las radiaciones y probablemente habría que construir reactores destinados exclusivamente a los fabricantes de neumáticos. La vulcanización podría hacerse también con fuentes de radiación de intensidad muy elevada, pero la producción de los fabricantes de neumáticos es tan grande que seguramente necesitarán reactores especialmente diseñados para ese fin; por eso es muy posible que no sólo tengamos reactores para la desalinización sino también para el tratamiento de neumáticos, por ejemplo.

Hay otros elastómeros - los polímeros de siliconas, por ejemplo - que se prestan fácilmente a la vulcanización por necesitar una dosis de radiación muy pequeña. Otra aplicación de interés para la industria de los neumáticos es el tratamiento del nylon; los cordones de nylon para neumático se mejoran por irradiación, lo cual puede también ser de importancia para el futuro de esa industria. No hay que olvidar tampoco que los ésteres polivinílicos dan por irradiación un elastómero, con lo cual pueden fabricarse neumáticos de caucho artificial. Hace ya tiempo que viene ensayándose este procedimiento, pero es difícil saber qué progresos se han conseguido porque no hay publicaciones muy detalladas sobre el particular.

La irradiación suele ser causa de degradación; en general, esto no es buena cosa, pero hay casos en que sí lo es. Por ejemplo, el dextrano es una molécula muy grande, demasiado grande para el plasma sanguíneo, pero irradiado con la dosis exacta se escinde y adquiere precisamente el peso molecular adecuado para emplearlo como sustitutivo del plasma sanguíneo. Esto supone una gran ventaja. A la inversa, un monómero se puede convertir en polímero por irradiación. Un compuesto relativamente sencillo como la N-vinil-pirrolidona puede transformarse hasta alcanzar el peso molecular

adecuado para convertirse en sustitutivo de la sangre. El tercer método es la polimerización por injerto, que da también moléculas del tamaño apetecido.

Así, para el plasma sanguíneo pueden emplearse tres procedimientos totalmente distintos: la degradación, la homopolimerización y la polimerización por injerto. Este último procedimiento tiene importantes aplicaciones también en la industria de las pinturas, y como existe toda una serie de materiales que pueden irradiarse lo más probable es que pronto dispongamos de pinturas con cualidades adhesivas mucho mejores.

La irradiación se emplea mucho también en la industria del petróleo, por ejemplo para el «cracking» de hidrocarburos.

Todos estos procesos se efectúan con las fuentes que ya he mencionado. Pueden emplearse fuentes de cobalto de elevada intensidad (salvo por lo que se refiere a la vulcanización del caucho, para la que tal vez sea necesario construir reactores debido al volumen de la producción que habrá que tratar), y si se necesitan energías más elevadas queda otra posibilidad: el empleo de fragmentos de fisión. Las energías gamma suelen ser del orden de 1,0 a 1,7 MeV, mientras que la de los fragmentos liberados en la fisión del uranio-235 es de 162 MeV. Se pueden construir plantas químiconucleares para producir este tipo de energía, pero los problemas técnicos que hay que vencer son complicadísimos. Se han hecho experimentos interesantes y se han obtenido algunos compuestos por este método. Por el momento este sistema se halla en plena fase de investigación, pero es muy probable que en lo futuro se puedan aprovechar realmente bien los fragmentos de fisión para irradiar materiales.

## SINTESIS POR IRRADIACION

Otro uso importante de las radiaciones es como agente catalizador; por ejemplo, con una fuente pequeña de 18 000 curies se ha sintetizado bromuro etílico a partir de bromuro de hidrógeno y de etileno. Aunque se han hecho muchos experimentos con toda clase de bromuros, éste es, que yo sepa, el primer proceso industrial en que un compuesto orgánico se ha sintetizado por irradiación en escala comercial.

Veamos, someramente, cómo se ha desarrollado la síntesis química en los últimos 100 años. Se ha recurrido principalmente a las variaciones de temperatura y presión - por ejemplo, preparación al vacío -, a la electricidad (con arco voltaico o haciendo pasar una corriente) y, desde 1900, a los catalizadores. No se ha empleado ningún otro sistema; todos los compuestos que se sintetizan hoy en día (y son más de un millón) lo son por uno de estos métodos.

Ahora tenemos un sistema completamente nuevo: la irradiación, que es distinto de la presión y la temperatura. No es de extrañar que al cabo de diez años de investigación hayamos avanzado tan poco porque el efecto de las radiaciones es sobre todo un efecto de impacto. Las radiaciones golpean todo lo que encuentran en su camino y la energía con que golpean suele ser mucho mayor que la energía de enlace de los átomos en las moléculas, lo que nos

obliga a analizar los efectos resultantes. Ahora bien, es la primera vez que poseemos un instrumento totalmente nuevo para la preparación de compuestos químicos, y esto es lo que hace tan interesante su empleo. Una temperatura muy elevada hace que las moléculas se muevan algo más deprisa y el vacío alarga su recorrido libre medio. En cambio, con las radiaciones se pueden hacer cosas totalmente distintas: escindir las moléculas, reticularlas, combinarlas, producir radicales libres, etc., construyendo así una química completamente nueva. Creo que la síntesis por irradiación tiene un gran porvenir, mucho mejor de lo que parecen presagiar los escasos resultados positivos que se han logrado hasta ahora.

Desde luego, las radiaciones tienen efectos muy considerables sobre los seres vivos, lo cual se aprovecha para irradiar determinados materiales médicos. Todo lo que no se puede esterilizar fácilmente calentándolo porque se descompondría, se puede esterilizar con rayos ultravioleta (estos rayos se emplean de vez en cuando, pero no son suficientemente penetrantes) o con electrones o radiaciones gamma que penetran más profundamente y por lo tanto son más útiles. En este caso, la radiación no crea ni transforma nada: lo único que hace es matar. Ahora bien, las radiaciones no lo matan todo; cuando hablamos de esterilizar algo, debemos aclarar lo que esto significa. Por ejemplo, irradiando bacterias, lo que hacemos es reducir su número en la misma proporción durante cada período de tiempo que queda expuesto el objeto. O sea que después de cierto tiempo el número de bacterias queda reducido en un décimo; después de otro período igual las restantes quedan reducidas en otro décimo y así sucesivamente, con lo que nunca mataremos a todas. Por lo tanto, no cabe hablar en este caso de «esterilización» propiamente dicha. Eso sí, se reduce el número de bacterias a determinada fracción, y el problema para los que utilizan las radiaciones con este fin está en determinar el grado de esterilización conseguido, lo que depende en gran medida del estado inicial del producto. Si el producto estaba muy «contaminado» y la cantidad de bacterias que contenía era, por ejemplo, de  $10^7$ , aunque las reduzcamos a  $10^5$  el producto seguirá estando «contaminado» al final. Pero si comenzamos, como es lo normal, con un producto que sólo contenga unas cuantas bacterias y reducimos su número en un factor de  $10^7$ , por ejemplo, entonces podemos afirmar sin temor que el producto ha quedado esterilizado.

## APLICACIONES MEDICAS DE LA IRRADIACION

En muchos países hay empresas que se dedican a esterilizar toda una serie de artículos médicos - sondas, jeringas, etc. - utilizando aceleradores o fuentes de cobalto. Una empresa americana que inició esta clase de trabajo abandonó el empleo de aceleradores por el de fuentes de cobalto, estimando que merecían mayor confianza. Después de muchos experimentos efectuados en su mayor parte con las bacterias más resistentes a las radiaciones, se descubrió que una dosis de 2,5 MeV reduce el número de bacterias en  $10^7$ . Se hicieron ensayos con los productos de la cadena de producción antes de irradiarlos, para ver cuántas bacterias contenían, y por lo general se encontraron muy pocas. Esto significa que en una jeringa, de un millón o de cinco millones de bacterias, por ejemplo, sólo quedaría una.

En medicina también se utiliza la irradiación para otras finalidades; por ejemplo, para esterilizar injertos de vasos arteriales. Este procedimiento no se ha implantado aún en gran escala; en cambio el injerto de huesos, sí. Es fácil esterilizar los injertos de hueso por irradiación; sólo en un hospital se han irradiado injertos de hueso de 1000 pacientes y aunque en uno o dos casos se han encontrado organismos, lo cierto es que no procedían del injerto. Se irradia también el material de sutura, con la ventaja de que, como está previamente envasado y se irradia después, no hay riesgo alguno de contaminación. Hay toda una serie de preparados farmacéuticos que son difíciles de esterilizar por calentamiento; se trata sobre todo de algunos antibióticos, que resisten a las radiaciones pero sólo hasta cierto punto. Lo primero que hay que averiguar es qué es lo que resiste en el compuesto y qué es lo que resulta perjudicado, y utilizar sólo los compuestos que no sufren deterioro y cuyos efectos no experimentan modificaciones al irradiarlos para destruir las bacterias que puedan contener.

También podría hablarles extensamente del empleo de las radiaciones en agricultura, pero me limitaré a decirles que la irradiación inhibe el desarrollo de las alcachofas, de las patatas y de las cebollas, que se puede esterilizar el suelo, que con las radiaciones se pueden mejorar las especies vegetales e incluso conservar los productos alimenticios. Además, se pueden exterminar los parásitos y los insectos nocivos por irradiación directa o, indirectamente, esterilizando a los machos.

Como verán ustedes, las posibilidades de la irradiación son prácticamente ilimitadas, tanto en la química como en la agricultura o para la esterilización de materiales y preparados médicos. Personalmente, creo que las radiaciones desempeñarán un papel muy importante en relación con los elastómeros y plásticos. He procurado hacerles una breve reseña de los usos de las radiaciones y demostrarles que ésta es una esfera verdaderamente interesante. Contamos con un instrumento nuevo, un instrumento que nos reportará enormes beneficios.