

**Prospección de radiación  
electromagnética ambiental  
no ionizante**

Radiación de radiofrecuencias:  
Consideraciones biofísicas, biomédicas  
y criterios para el establecimiento  
de estándares de exposición

**VOLUMEN II**

**Texto digitalizado y revisado del original  
por el personal del Centro de Información Técnica  
de la Comisión Nacional de Comunicaciones**

ADOLFO PORTELA  
Investigador Superior  
del Consejo Nacional de Investigaciones  
Científicas y Técnicas, Centro de Estudios Comparados (CEC)  
Asesor Científico del Estado Mayor General de la Fuerza Aérea

JORGE JUAN SKVARCA  
Jefe del Departamento de Radiofísica Sanitaria  
Dirección Nacional de Calidad Ambiental  
Secretaría de Salud  
Ministerio de Salud y Acción Social

EDGARDO B. MATUTE BRAVO  
Director General de Defensa Nacional  
Secretaría de Comunicaciones  
Ministerio de Obras y Servicios Públicos

LUIS A. LOUREIRO  
Estado Mayor General del Ejército Uruguayo,  
República Oriental del Uruguay  
Investigador Visitante, Centro de Estudios Comparados (CEC)

DIRECCION NACIONAL DE CALIDAD AMBIENTAL  
SECRETARIA DE SALUD  
MINISTERIO DE SALUD Y ACCION SOCIAL

Los autores agradecen la tarea realizada por el  
personal de la Imprenta del Congreso de la Nación

## PROLOGO

La exposición de la población en general causada por fuentes artificiales de radiaciones de radiofrecuencia (RF) y microondas (MO) excede hoy día considerablemente la provocada por fuentes naturales. El vertiginoso incremento de esas fuentes y el aumento en sus potencias probablemente llegue a producir una "contaminación electromagnética".

Entre las principales fuentes artificiales se incluyen las instalaciones de radar, emisoras radiales y de TV, equipos de telecomunicaciones, etcétera. Por otra parte los equipos de uso industrial, comercial y doméstico, en particular aquellos en los que la energía se utiliza para producir calor, también implican un riesgo potencial.

Los problemas de contaminación varían entre la simple interferencia electromagnética, como por ejemplo la que afecta la operación de un servicio de salud, y los riesgos directos para la salud de las personas expuestas a tales radiaciones.

Hoy día ya se dispone de pruebas, aunque escasas, de los efectos en el hombre debido a exposición excesiva, aguda y accidental. A fin de obtener mayor información deben incrementarse investigaciones epidemiológicas serias.

Estas últimas, junto con las consideraciones teóricas y estudios con animales de experimentación, constituyen la base para establecer normas para la protección de la salud.

En algunos países dichas normas han sido modificadas recientemente y existe una tendencia a adoptar límites de exposición menos dispares en comparación con las propuestas hace 15 años.

Nuestro país, a través, de la Dirección Nacional de Calidad Ambiental, de la Secretaría de Salud, preparó en base a estudios e investigaciones realizadas por el Instituto de Investigaciones Biofísicas (INDEBIO) como también otros organismos e instituciones internacionales, *Prospección de radiación electromagnética ambiental no ionizante*. Su primera parte, el Manual de estándares de seguridad para la exposición a radiofrecuencias comprendidas entre 100KHz y 300GHz, propone los límites de exposición ocupacional y a la población en general.

En su segunda parte se proponen también normas de seguridad en telecomunicaciones y radar con ejemplos prácticos de medición y cálculo. En la misma se exponen consideraciones biofísicas y criterios tenidos en cuenta en esta publicación.

La Dirección Nacional de Calidad Ambiental agradece a todos los colaboradores de esta publicación al mismo tiempo que subraya la necesidad de continuar y perfeccionar la labor iniciada en este campo.

MINISTERIO DE SALUD Y ACCIÓN SOCIAL  
SECRETARÍA DE SALUD  
DIRECCIÓN NACIONAL DE CALIDAD AMBIENTAL  
AÑO 1988

## Planteo de la obra

Los riesgos asociados con la tecnología nuclear o de radiación X, fueron estudiados con antelación a su aplicación general (y siguen estudiándose y evaluándose) posibilitando el establecimiento y la revisión de normas de seguridad para el personal que trabaja en instalaciones; y para el medio ambiental, con actitud sanitaria preventiva. Esta labor permanente de investigación en el área de los bioefectos de la radiación electromagnética ionizante (rayos X y gamma) permitió reducir los riesgos, y por lo tanto aumentar la utilización de dispositivos nucleares generadores de energía, así como también de aquellos derivados de la tecnología de radiación X (medicina, industria).

El desarrollo de la tecnología del electromagnetismo, con su rápida utilización de la energía de radiofrecuencias (incluye el ámbito de microondas) en sistemas de comunicaciones, radares, industria del moldeado de plásticos, hornos domésticos, medicina (diatermia), instalaciones de uso civil y militar, etcétera, ha provocado un nuevo tipo potencial de contaminante ambiental, de incidencia creciente.

Muchos son los países - incluyendo el nuestro- que han dictado reglamentaciones contra todo aquello que provoque contaminación ambiental: desde establecer niveles permisibles - cuando es inevitable el uso de determinados medios - hasta la desaparición del elemento agresivo productor.

Los efectos de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes de radiofrecuencias son motivo de preocupación, ya que sus manifestaciones tienen un determinado espectro de daños, cubriendo desde lesiones leves y temporarias hasta graves y permanentes (crónicas e irreversibles); todo depende de la interacción entre los sistemas biológicos y las radiaciones, de acuerdo a sus características.

Los países que poseen alta tecnología han manifestado su preocupación y han alertado a los demás, en etapa anterior de desarrollo, porque consideraron que este tipo de contaminación electromagnética puede constituir una real amenaza, aunque de menor grado que la contaminación química industrial que afecta actualmente a los grandes centros fabriles del mundo.

El problema de la dosimetría es muchísimo más complicado en el caso de la radiación electromagnética no ionizante (radiofrecuencias) que en el de la radiación electromagnética ionizante (X, gamma) En consecuencia, hemos trabajado en el laboratorio, para la obtención de información cuantitativa sobre la distribución de campos eléctricos (E) y magnéticos (H), y de la energía absorbida en sistemas biológicos, en estrecha colaboración con centros de investigación internacionales (período 1972-1987).

Es obvio que los estándares de protección contra la radiación de radiofrecuencias deben expresarse en términos de la intensidad del campo E (y H) y densidad de potencia  $P_d$  en el espacio libre.

El propósito de la prospección de radiación de radiofrecuencias es medir los campos E y H, y  $P_d$  en el ambiente donde el hombre puede estar eventualmente expuesto y comparar esas mediciones con los estándares de niveles permisibles de exposición establecidos.

Los monitores miden  $E^2$ , que en el campo de radiación electromagnética es proporcional a  $P_d$ .

Hasta la década del 70 era casi imposible lograr cualquier tipo de conclusión cuantitativa acerca de dosimetría obtenida de estas mediciones, debido a la variedad de condiciones posibles de exposición. Así, resultó necesario establecer en el laboratorio, una relación cuantitativa entre los campos medidos externamente y los campos E inducidos en la masa corporal compleja

(tejidos, órganos, sistemas). De esta manera, se logró determinar la absorción específica de energía electromagnética en los tejidos, y relacionarla con los efectos biológicos observados.

Debido al desarrollo alcanzado en los últimos años, se ha implementado la tecnología y teoría para determinar E, H y  $P_d$  en el nivel de tejidos, órganos, sistemas, normatizándose así las metodologías dosimétricas empleadas. De esta manera se estableció un criterio entre laboratorios de diferentes naciones técnicamente avanzadas, respecto del nivel de exposición a radiofrecuencias que debe considerarse primariamente no riesgoso.

En conclusión, los resultados de laboratorio y epidemiológicos han conducido progresivamente a la revisión de los estándares de exposición existentes.

El presente trabajo fue realizado para desarrollar un manual de estándares de seguridad para la exposición a radiofrecuencias. El mismo se fundamentó en los posibles riesgos de exposición. Esta obra se presenta en dos volúmenes.

El contenido del volumen I se ha dividido en dos partes. La primera parte comprende "Manual para estándares de seguridad: Límites de exposición ocupacional y poblacional en general a campos electromagnéticos (EM) de radiofrecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz"; y la segunda parte incorpora "Normas de seguridad para la exposición ocupacional del personal de telecomunicaciones y estaciones de radar: ejemplos prácticos de medición y cálculo de la exposición a radiofrecuencias".

El volumen II, titulado "Radiación de radiofrecuencias: consideraciones biofísicas, biomédicas y criterios para el establecimiento de estándares de exposición", también se ha confeccionado en dos partes.

La primera parte trata de "Filosofía del establecimiento de estándares de emisión y estándares de exposición: protección para radiación de radiofrecuencias"; y la segunda parte presenta la fundamentación biomédica para el establecimiento de los estándares "Biofísica de las radiaciones y dosimetría: absorción y distribución de la energía electromagnética de radiofrecuencias en el cuerpo humano".

## **Colaboradores**

Alférez Carlos A. Rossi; mayor Rafael González Osterode y comodoro Francisco P. Matassi, miembros de los comandos de Instrucción, Regiones Aéreas y Operaciones Aéreas, respectivamente, del Estado Mayor General de la Fuerza Aérea.

Ingenieros Jorge Marchesano, Lucio Mancini y Maño Alberto Pascual, director Departamento de Operaciones, jefe de la Sección Principal Radioaficionados y jefe de la Sección Principal. de la Red de Emergencia Nacional, respectivamente, de la Dirección General de Defensa Nacional, Secretaría de Comunicaciones, Ministerio de Obras y Servicios Públicos.

Los miembros del Club de Buenos Aires, destacándose por las estimulantes discusiones durante el desarrollo del trabajo y en la formación del banco de datos.

Pedro C. Hessling Aleman, integrante de comisiones de Ciencia y Tecnología de las Cámaras de Diputados y Senadores, del Congreso Nacional, quien participó en la filosofía del establecimiento de estándares de exposición, asegurando la claridad de los criterios elaborados, que en definitiva plasmaron el manual.

Los miembros de las facultades de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Católica de Salta, quienes siguieron el desarrollo de los estudios y contribuyeron en discusiones y seminarios.

## **Síntesis**

Todas las guías o estándares son por su naturaleza, evolucionarias, puesto que están basadas en el conocimiento existente en el momento de su confección.

Las revisiones y refinamientos ocurren a medida que el conocimiento se amplía.

Las perspectivas de revisiones futuras de estas guías o estándares son considerables.

# Indice

Prólogo  
Planteo de la obra  
Colaboradores  
Síntesis

## PRIMERA PARTE

Estándares de protección para radiación de RF  
Filosofía del establecimiento de estándares  
Estándares de emisión  
Estándares de exposición  
Conclusiones  
Estándares de exposición humana  
Tabla 1  
Tabla 2

## SEGUNDA PARTE

1 Resumen  
2 Fuentes de radiación por microondas  
2.1 Sistemas de comunicación por satélite  
2.2 Sistemas de radar  
2.3 Transmisores de radiodifusión  
2.4 Aparatos emisores de energía de microondas para la producción de calor  
3.0 Biofísica - Absorción y distribución de la energía  
3.1 Características del medio biológico  
3.2 Onda plana incidiendo en láminas planas de tejido  
3.3 Capas de tejido esféricas expuestas a ondas planas  
3.4 Modelos elipsoidal y esférico - prolato de hombre y animales  
3.5 Modelos varios y condiciones de exposición  
3.6 Métodos de medición - Dosimetría  
4.0 Mecanismos de interacción  
4.1 Interacciones macroscópicas  
4.2 Interacción microscópica - Mecanismos moleculares  
4.3 Interacciones celulares  
4.4 Interacción a través de fuerzas inducidas por el campo  
4.5 Otros mecanismos de interacción  
4.6 Consideraciones térmicas en la absorción de ondas EM  
4.7 Interacción de microondas con materiales biológicos  
4.8 Propiedades dieléctricas  
4.9 Características de propagación y absorción de las ondas  
5.0 Efectos de RF - Microondas en marcapasos  
6.0 Fisiología de la termorregulación: Neuroendocrinología  
7.0 Información adicional que completará la historia clínica del personal  
trajando en RF - Microondas

Laboratorio  
Tablas 1 al 13  
Figuras 1 al 27  
Diagramas 1 al 20  
Referencias

## **Primera parte**

# **Filosofía del establecimiento de estándares de emisión y estándares de exposición: protección para radiación de radiofrecuencias**

## **ESTANDARES DE PROTECCION PARA RADIACION DE RADIOFRECUENCIAS**

La radiación de radiofrecuencias en determinadas intensidades y duraciones de exposición puede producir efectos biológicos dañinos de acuerdo con la bibliografía conocida.

Para proteger a la población en general y al personal expuesto ocupacionalmente se proponen dos tipos de estándares:

- Pautas para la protección del personal (estándares de exposición) y
- Regulación del funcionamiento de los sistemas emisores de radiofrecuencia (estándares de emisión) .

Un estándar de exposición se refiere al máximo nivel de exposición permisible de cuerpo entero (CE) o de algunas partes del mismo, y generalmente considera por lo menos diez factores de seguridad.

Un estándar de emisión se refiere a los equipos y especifica la emisión máxima (fuga de radiación) desde el dispositivo, a una distancia especificada. La máxima emisión permisible (o fuga) es tal que la exposición que resulta de ella, se encuentra generalmente varios órdenes de magnitud por debajo del estándar de exposición del personal. Los estándares para emisión y exposición del personal están programados para proteger al público en general y al trabajador, pero no se aplican para la utilización de energía de RF-MO con propósitos de diagnóstico o terapéuticos (ejemplo: diatermia; Ver Portela, Congreso Internacional del Cáncer, 1978; 1er. Congreso Mundial de Ingeniería y Medio Ambiente, 1981).

### **FILOSOFIA DEL ESTABLECIMIENTO DE ESTANDARES**

El establecimiento de estándares no es tarea fácil y requiere de una perspectiva adecuada y de la determinación realista de los efectos biológicos de manera que un individuo o el público en general no sean expuestos excesivamente. Más aun, la utilización provechosa de la energía no debería ser impedida o restringida innecesariamente.

La cuantificación de la respuesta biológica a las radiofrecuencias es un problema complejo debido al amplio espectro de frecuencias, gran número de variables físicas y biológicas y a las correlaciones entre estas variables.

Si hubiera una relación establecida cuantitativamente entre las densidades de potencia de la radiación incidente y todos los efectos biológicos en el ser humano, sería simple definir los niveles de seguridad.

Desafortunadamente nuestro conocimiento no es completo; la mayor parte de los datos científicos han sido obtenidos a partir de la experimentación en pequeños mamíferos o en organismos más simples; y relacionar los resultados experimentales al ser humano no es siempre un proceso definido claramente, por cuanto no puede realizarse simplemente una extrapolación. Además, existe una gran cantidad de evidencia no corroborada y contradictoria sobre varios efectos biológicos. En cualquier caso, debería hacerse la distinción precisa entre efectos *per se* y efectos potencialmente dañinos.

La comprensión del mecanismo de interacción que precede al efecto ayuda en gran medida a la traducción de los resultados experimentales en posibles riesgos de exposición para el hombre.

Diferentes filosofías son la base de los estándares de seguridad para los diversos países. Por ejemplo la URSS y algunos países del este europeo parecen aplicar para el establecimiento de sus estándares el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) que implica que

cualquier exposición a la radiación de RF-MO debería ser limitada ya que puede comprender algún grado de riesgo.

En algunas instancias se emplea un factor de seguridad de 100 o aun 1.000.

Los interrogantes básicos que deben resolverse antes del establecimiento de estándares para la radiación de RF-MO fueron formulados durante la realización del trabajo, como sigue:

- ¿Los efectos biológicos observados en el ser humano son producidos por la exposición a radiofrecuencias?
- ¿Podrían estos efectos representar un riesgo sanitario potencial para el público en general o para el personal expuesto ocupacionalmente?
- ¿Cuáles son las fuentes de microondas? ¿Cuál es su régimen de crecimiento? ¿Son controlables?
- ¿Aliviarían este problema los estándares?
- ¿Cuál es el riesgo de exposición aceptable para la salud?
- ¿Cuál es el impacto económico que ocasiona el control?

Como la cantidad de datos sobre los efectos de la radiación de radiofrecuencias sobre el ser humano es muy limitada, es necesario atenerse a los datos de exposición de animales y modelos.

### **ESTANDARES DE EMISION**

Los estándares de emisión limitan la emisión de radiación desde dispositivos usados con frecuencia, en medios no controlados. Un ejemplo típico de estándares de emisión es el de los hornos de microondas en Canadá y en los Estados Unidos.

Las regulaciones canadienses se aplican para aparatos o serie de componentes diseñados para proveer energía de RF-MO a materiales dentro de una cavidad, en el rango de frecuencias de 10 MHz a 300 GHz; en otros términos, para hornos de microondas industriales, domésticos y comerciales. La emisión de radiación permitida es 1 mW/cm<sup>2</sup> con una carga de agua de 50 ml y 5 mW/cm<sup>2</sup> sin carga, a una distancia desde el horno de 5 cm. Las reglamentaciones de los Estados Unidos se aplican a los hornos de microondas usados en los hogares, restaurantes, comercios de despacho de alimentos y otros establecimientos similares que operan a frecuencias entre 980 MHz y 6 GHz en las bandas distribuidas ISM. La densidad de potencia de la radiación emitida por un horno de microondas a una distancia de 5 cm desde el mismo no debe exceder 1 mW/cm<sup>2</sup> antes de su adquisición por el cliente o comprador, y no más de 5 mW/cm<sup>2</sup> posteriormente. La carga de prueba es de 274 ml de agua. Adicionalmente, ambas regulaciones requieren otros aspectos de seguridad, como absorbentes para proteger de posibles exposiciones por mal funcionamiento del horno.

Otro ejemplo de estándares de emisión es la regulación de la diatermia que ha sido propuesta en Canadá y en los Estados Unidos.

Es conveniente examinar los niveles de exposición humana que puedan resultar de la emisión de radiación máxima de RF-MO, de 5 mW/cm<sup>2</sup>.

La densidad de potencia de radiación en la cercanía de un horno con filtración de microondas disminuye rápidamente, aproximadamente como la inversa del cuadrado de la distancia desde el horno. A una distancia de 30 cm desde un horno que opera a 2.450 MHz, la densidad de potencia es de alrededor de 0,1 mW/cm<sup>2</sup>, mientras que a 1 m disminuye a 0,01 mW/cm<sup>2</sup>.

Se realizó por termografía, un cálculo de la energía depositada en modelos de seres humanos expuestos a la emisión electromagnética de un horno que opera a 915 MHz.

Los resultados del estudio resumido en la tabla 1 muestran los valores del régimen de absorción específico de energía en varias partes de un modelo de mujer y de niño a tres distancias diferentes desde el horno para una pérdida de radiación de  $1 \text{ mW/cm}^2$  y a 5 cm desde el horno. El régimen de absorción metabólico de reposo (basal) de un adulto promedio es aproximadamente de  $1,65 \text{ W/Kg}$

## ESTANDARES DE EXPOSICION

A pesar de que se ha reconocido la necesidad de establecer estándares de exposición unificados y de aceptación internacional, y del esfuerzo realizado para lograr el Acuerdo, aún existe una diferencia entre los estándares de los países occidentales, y aquellos de la URSS y de los países de Europa Oriental. En varios países se han preparado algunas revisiones limitadas de los estándares de exposición que se resumen a continuación.

Existen dos tipos de estándares según el grupo de personas que se proteja, los que específicamente son:

- el estándar ocupacional para proteger a las personas que trabajan en medios de radiación de RF-MO, y
- estándares ambientales (también llamados estándares de salud pública), para proteger a la población en general.

Las condiciones de los estándares en la URSS, Polonia, Checoslovaquia, Bulgaria, República Democrática Alemana se presentan en la tabla 1, del volumen I (primera parte) de este trabajo.

Las condiciones de los estándares para Estados Unidos, Canadá y los países de Europa occidental se resumen en dicha tabla 1.

Algunos otros países no indicados en la misma como Gran Bretaña, Alemania, estipulan límites máximos de exposición permisible prácticamente idénticos a los del estándar del U.S. A.N.S.I.

Se pueden notar varias diferencias fundamentales en estos estándares. El estándar ocupacional de la URSS especifica  $5 \text{ V/m}$  como la máxima intensidad de campo eléctrico permisible para frecuencias entre 50 y 300 MHz. La densidad de potencia equivalente es de  $6,7 \mu\text{W/cm}^2$ , mientras que para frecuencias arriba de 300 MHz se permiten  $10 \mu\text{W/cm}^2$ . \*En el rango de frecuencias de 30 a 50 MHz, se permite una intensidad de campo eléctrico de  $10 \text{ V/m}$ , la intensidad de campo magnético que da la misma densidad de potencia, es de  $0,027 \text{ A/m}$ , pero se permite una intensidad de campo magnético diez veces mayor ( $0,3 \text{ A/m}$ ). Existía una razón lógica para estas diferencias en las condiciones de los estándares.

Está claro que los límites para las antenas rotatorias corresponden a los valores medidos con antenas estacionarias, tal como se requiere en la sección sobre mediciones (ver volumen I) En situaciones prácticas en campo cercano, la densidad de potencia promedio calculada tomando en cuenta el factor de reducción rotacional, puede ser con frecuencia mayor que una décima de la densidad de potencia de la antena estacionaria. Por otro lado, en campo lejano de un radar de haz angosto, la densidad de potencia promedio puede ser 100 veces menor que aquella para antena estacionaria.

Es interesante notar, que no se hacen distinciones entre antenas estacionarias y rotatorias en los estándares de la URSS relacionados con la radiación de RF-MO en la población en general.

También son claras las condiciones para los estándares relacionados con antenas rotatorias y estacionarias en Polonia ya que está sobreentendido a qué valor de densidad de

---

\* Se tuvo en cuenta el ámbito de frecuencias resonantes del hombre

potencia (medido o calculado tomando en cuenta el factor de reducción rotacional) se refiere el límite. Para antenas estacionarias, se permite una exposición ocupacional cinco veces mayor que la exposición de la población en general ( $1 \text{ mW/cm}^2$  versus  $0,2 \text{ mW/cm}^2$ ); para antenas rotatorias es diez veces mayor ( $10 \text{ mW/cm}^2$  versus  $0,1 \text{ mW/cm}^2$ ).

Es interesante notar que se consideran varios factores de seguridad en los estándares para población en general, que dependen del rango de frecuencia. Los factores de seguridad 20, 10 y 3 se aplican a las frecuencias entre 0,3 y 300 GHz de antenas estacionarias y entre 10 y 300 MHz de antenas rotatorias.

Se puede notar una información escasa en algunos estándares que sólo especifican niveles de densidad de potencia, mientras que según se señalara en el desarrollo de este trabajo en campo cercano sólo es posible determinar las intensidades de campo eléctrico y magnético, y sólo la densidad de potencia equivalente de onda plana es una cantidad definida en campo lejano.

## CONCLUSIONES

Se ha logrado un gran progreso en la comprensión de las consecuencias que puede traer sobre la salud la exposición a radiofrecuencias (RF - microondas [MO]), en el rango de frecuencias entre 10 MHz y 300GHz. Los diversos aspectos de los efectos biológicos han sido tratados con diferentes grados de atención -según fuera el caso- y han sido resueltos con diferentes grados de éxito.

En general, la mejor cooperación interdisciplinaria y el diálogo científico internacional han dado como resultado un mayor nivel de acuerdo con respecto a los resultados de las investigaciones realizadas en los últimos años.

Las principales dificultades en la determinación de los riesgos sanitarios potenciales de la exposición humana a RF-MO y en la cuantificación de los resultados de experimentos con animales, derivan de la gran complejidad de las relaciones simples entre las condiciones de exposición y la energía absorbida. No existen métodos directos para medir normalmente la dosis de energía. Más aún, la relación entre la dosis y el efecto no es simple en absoluto (ni se comprende bien).

La dosis absorbida, la energía total absorbida, Régimen de Absorción Específica (SAR), dependen de varios parámetros tales como frecuencia del campo, polarización, la representación sujeto - fuente, tamaño y forma del sujeto, y de factores ambientales como la presencia de objetos metálicos u otros objetos vivientes.

El régimen de deposición de energía en el sistema viviente, que resulta de la exposición, es altamente no uniforme. La distribución espacial de la energía absorbida depende de los parámetros del campo, como la frecuencia, polarización, modo de propagación (por ejemplo, una onda plana) y de las características del sistema, estructura interna del tejido, etcétera. Recientemente se ha logrado un progreso considerable en cuanto a dosimetría, y la comunidad de investigadores ha avalado el control estricto de las condiciones de exposición por su importancia. Idénticas condiciones de exposición dan como resultado no sólo diferentes valores de la energía total absorbida sino también diferentes distribuciones en el espacio de la energía absorbida en los cuerpos de las diferentes especies de animales. Aun suponiendo que se conocen la distribución de energía y el calor resultante, los efectos psicológicos no siempre pueden ser determinados para varias especies, inclusive para el hombre.

La falta de conocimiento, o el reconocimiento insuficiente de la complicada relación entre la dosis y el campo de exposición, debido a la falta de datos de dosimetría cuantitativa en los primeros trabajos experimentales de Occidente y en la mayor parte de los trabajos de los países del bloque soviético y de Europa oriental, trajo aparejado que los resultados de estos experimentos tuvieran un valor limitado. Sin embargo, el progreso que se ha alcanzado en los años más recientes en cuanto a dosimetría, ha abierto nuevos caminos para la investigación más rigurosa de los efectos biológicos de RF - microondas (MO).

Los puntos principales de las investigaciones recientes en el campo de la dosimetría incluyen el establecimiento de la existencia de frecuencias resonantes para el cuerpo entero y sus partes, en varias especies de animales, y también el desarrollo de métodos teóricos para predecir estas frecuencias resonantes. A pesar de que estos métodos emplean ciertas suposiciones simplificadoras, han sido verificados experimentalmente, y su valor e importancia son innegables. La absorción promedio del cuerpo entero (CE) puede ser calculada a partir del régimen de absorción Específica (SAR), dadas las varias condiciones de exposición a una onda plana de los diversos animales. El uso de un *Manual de dosimetría* en preparación (A. Portela, J. Skvarca, L. A. Loureiro, 1988) es una herramienta sumamente útil para la cuantificación de los resultados de experimentos en animales y para extrapolar los datos al ser humano. El calentamiento no uniforme del cuerpo humano o animal y de sus partes -específicamente la cabeza- ha sido demostrado y se dispone de los métodos que permiten de la cabeza con la inducción de hot spots (puntos calientes). El empleo de métodos dosimétricos en los experimentos con animales ha suministrado, en los últimos años, más datos cuantitativos y ha hecho posibles extrapolaciones más confiables a exposiciones de seres humanos. Una apreciación de la inducción de gradientes térmicos en cerebros de animales expuestos a campos de RF-MO conducirá a la determinación de mecanismos de interacción capaces de explicar los efectos fisiológicos y psicológicos observados.

Se han logrado nuevos progresos en las técnicas de medición y en la instrumentación para evaluar los campos incidentes, los campos inducidos internamente y las temperaturas resultantes en los animales experimentales durante la exposición. Se ha perfeccionado el diseño de las cámaras para exponer animales y se han desarrollado métodos más sofisticados para la exposición de preparaciones *in vitro*, equipos libres de "artefacto" (por ejemplo, electrodos implantables).

Las bases y mecanismos biofísicos del fenómeno de audición de microondas ya han sido establecidos.

Se ha reconocido la importancia del efecto que tiene este fenómeno en los estudios de comportamiento, cuando la exposición se realiza en campos pulsados, y se ha hecho hincapié en la posibilidad de interpretaciones erróneas de los primeros resultados experimentales.

Dos de los nuevos efectos investigados en los últimos años -ambos muy interesantes -, que pueden conducir a la determinación de los mecanismos de interacción y a una mayor comprensión de los efectos observados, son los cambios en el flujo de iones de calcio y la permeabilidad de la barrera sangre - cerebro.

El flujo de iones de calcio a través de las membranas del cerebro es afectado por campos de frecuencias extremadamente bajas (6-20 Hz) o por amplitudes moduladas de campos RF a estas frecuencias. Se han observado cambios en la permeabilidad de la barrera sangre - cerebro a niveles de densidad de potencia relativamente bajos ( $<10 \text{ mW/cm}^2$ , a frecuencias muy cercanas a la frecuencia de resonancia de la rata). El flujo de iones de calcio ha sido planteado independientemente por grupos de investigadores y a pesar de que ya se han sugerido algunos mecanismos de interacción, aún es necesario una explicación más acabada. El fenómeno de alteración de la permeabilidad de la barrera sangre - cerebro no se ha establecido bien, y requiere nuevas investigaciones antes de que pueda emitirse una hipótesis sobre su mecanismo de interacción.

Ha habido nuevos progresos en la obtención de datos cuantitativos de los efectos de exposición a densidades de potencia promedio relativamente bajas ( $<10 \text{ mW/cm}^2$ ), para el caso de neuroendócrinas y sistema nervioso central de animales pequeños; y en el desarrollo fetal, después de la irradiación durante etapas críticas de la gestación.

Parece haber consenso entre los científicos en que la mayoría de los efectos de la exposición a radiación de RF-MO, son de naturaleza térmica. Sin embargo, esta afirmación no debería ser tomada en forma simplista. Los efectos del calor inducido por RF-MO son

significativamente diferentes de los efectos producidos por otras modalidades de calentamiento. Tres rasgos característicos del calor inducido por RF-MO son: profundidad de penetración variada, existencia de *hot spots* internos y rapidez de calentamiento.

La inducción de no uniformidades en la temperatura de varias partes del cerebro puede producir alteraciones cuyo grado y consecuencias no se conocen completamente aún.

Pero todavía, es muy pronto para estar de acuerdo con todos los efectos de estrés térmico observados. Se ha establecido que la irradiación de animales pequeños a  $10 \text{ mW/cm}^2$  o menos, a determinadas frecuencias, puede dar como resultado niveles de calentamiento pequeños.

A frecuencias de resonancia - o cerca de las mismas- el animal "percibe" una intensidad de campo incidente mucho mayor que aquella medida por un medidor de densidad de potencia.

Los estudios realizados sobre los efectos en sistemas moleculares no han indicado en forma definida alteraciones no térmicas específicas en el rango de frecuencias de 10 MHz- 300 GHz.

La excepción, flujo de iones de calcio, está relacionada específicamente con frecuencias muy bajas (cercanas a las frecuencias de ondas cerebrales).

No obstante el progreso alcanzado en los últimos años, aún es necesario realizar nuevas investigaciones sobre efectos biológicos de la radiación de RF-MO para lograr una mayor comprensión de los mecanismos de interacción y de las consecuencias para la salud humana. Es conveniente efectuar un enfoque interdisciplinario y formular en forma definida y competente los interrogantes más importantes. Es necesario realizar más estudios sobre las siguientes áreas en particular:

1. Efectos biológicos y psicológicos de exposiciones crónicas de nivel bajo (menor que  $10 \text{ mW/cm}^2$ ) en los sistemas neuroendócrino y nervioso. Esto debería incluir la evaluación del estrés térmico de largo plazo producido por calentamiento rápido y no uniforme de varias partes del cuerpo, aún a niveles relativamente bajos.
2. Determinación del valor de los datos de animales para predecir la respuesta humana.
3. Estudios de la permeabilidad de la barrera sangre - cerebro.
4. Interacción de campos de RF-MO con membranas incluyendo efectos de frecuencia modulada.
5. Efectos de la exposición en los componentes de la sangre, teniendo en cuenta las contradicciones en resultados informados (por ejemplo, linfocitos)
6. Efectos de la exposición a radiación de ondas milimétricas.
7. Dosimetría de exposiciones en campo cercano y de radiación múltiple.
8. Métodos de medición e instrumentación para mediciones en materiales biológicos in vivo durante la exposición, especialmente con el fin de obtener datos de dosimetría esenciales.

Además, los resultados experimentales deberán ser determinados no sólo para definir el carácter cuantitativo de un efecto sino también para proveer una distinción entre un efecto benigno y uno riesgoso. También es necesario realizar una revisión crítica de todos los trabajos publicados. Desafortunadamente, el proceso de revisión exhaustiva no ha sido lo suficientemente estricto, y muchos informes de estudios conducidos en forma deficiente han producido considerable confusión en el campo.

El uso difundido y en constante aumento de las energías de RF-MO y la existencia de efectos dañinos con respecto a las mismas - cuando se las usa sin control -, hacen que se aplique el principio de protección de la salud pública al control de las radiaciones de RF-MO. Este control debería ejercerse para asegurar que el trabajador y la población en general no serán expuestos indebidamente, y que el progreso tecnológico y las aplicaciones provechosas de estas energías no serán obstaculizados ni restringidos innecesariamente.

## ESTANDARES DE EXPOSICION HUMANA

Los diversos factores que deben considerarse para el desarrollo de estándares de exposición han sido revisados.

A continuación se hace un resumen de las premisas y condiciones básicas de tal estándar, basándonos en la revisión de la información disponible:

1. La interacción de los campos de RF-MO con sistemas biológicos (con la posibilidad de efectos de modulación especiales) se realiza a través de mecanismos de conversión térmica.
2. El estrés térmico inducido por exposición a RF-MO es específico para estos tipos de energía, debido a la rapidez de calentamiento y al calentamiento profundo no uniforme que puede dar como resultado gradientes térmicos en el cuerpo.
3. La absorción de energía de radiofrecuencia y su distribución espacial en el cuerpo humano dependen de la frecuencia.
4. Debe emplearse un enfoque prudente para el establecimiento de niveles permisibles máximos de exposición ya que los riesgos sanitarios potenciales de la irradiación crónica de nivel bajo aún no han sido determinados.
5. Hasta el momento no se dispone de información suficiente para establecer los diferentes límites para radiación pulsada, a pesar de que se reconoce la posibilidad de que la radiación pulsada sea más dañina que la radiación de onda continua (OC o CW) en los mismos niveles de potencia promedio.
6. Aún no se han establecido efectos biológicos de nivel bajo realmente acumulativos de radiación de RF-MO.
7. La región de radiofrecuencias de 0, 1 MHz - 300 GHz puede ser dividida en cuatro ámbitos de frecuencias (ver volumen I, primera parte).

En el ámbito de frecuencias de 30 MHz - 400 MHz se produce un fenómeno de resonancia en el cuerpo entero y sus partes. El calentamiento de alguna de las partes puede ser un orden de magnitud mayor que la carga térmica promedio, cuando la radiación está cerca de la frecuencia de resonancia.

En la tabla 2 se establece una comparación entre el régimen de absorción específica (SAR) de exposiciones a  $1 \text{ mW/cm}^2$  y el régimen metabólico nasal promedio (BMR) para el hombre a varias frecuencias.

Es importante señalar aquí, que la frecuencia de resonancia disminuye cuando el blanco biológico está en contacto con el suelo. Para un hombre estándar en contacto eléctrico con el suelo, la frecuencia de resonancia es aproximadamente 40 MHz. En el caso de niños, es mayor que para el hombre estándar; por ejemplo, para un niño de 0,50 m de altura la frecuencia de resonancia es aproximadamente 230 MHz y los valores SAR/BMR de la tabla 2 deberían ser modificados, con respecto a la frecuencia.

Los datos de la tabla D indican que el valor máximo permisible de densidad de potencia de  $1 \text{ mW/cm}^2$  daría como resultado una carga térmica insignificante, aun en el peor caso de resonancia.

El  $\text{SAR}_{\text{prom}} \text{ CE}$  estaría un 20% debajo del metabolismo basal (BMR) con la posibilidad de un aumento al 30 % para un hombre en contacto con el suelo y a un 40% o más durante períodos cortos en presencia de reflectores metálicos.

Fuera de la región de resonancia, el régimen de absorción específica disminuye igual que la profundidad de penetración, y se forman *hot spots* sólo cerca de la superficie del cuerpo. En el rango de frecuencias de 1 GHz - 300 GHz, el máximo nivel permisible de densidad de potencia de 5 mW/cm<sup>2</sup> da como resultado una relación SAR/BMR debajo del 15 %.

8. En el rango de frecuencias de 0,1 MHz - 3 MHz especialmente en el extremo más bajo (ver volumen I).

Puede realizarse la exposición en campo cercano. La máxima exposición permisible debería ser definida en términos de la intensidad del campo eléctrico y magnético más que por la densidad de potencia.

El régimen de deposición de energía en el cuerpo humano depende, por otra parte, de las intensidades de campo E y H; y a frecuencias más bajas los campos inducidos en el cuerpo por el campo magnético son mayores que aquellos inducidos por el campo eléctrico.

9. Existe poca información, que pueda ser usada para establecer un máximo nivel permisible de irradiación para exposiciones parciales del cuerpo.

Además de la promulgación de estándares de exposición para la radiación de RF-MO con el objeto de asegurar la protección adecuada del trabajador y de la población, debería fijarse un programa educacional especialmente dirigido a aquellas personas expuestas ocupacionalmente a la radiación de RF-MO.

TABLA 1

**Los regímenes de absorción específica en mW/g de modelos de mujer y niño expuestos a 1 mW/cm<sup>2</sup>, medidos a 5 cm desde la fuente; f = 915 MHz.**

Sujeto y región del cuerpo Niño, 0.94m, 15Kg.	Distancia desde la fuente		
	4.8 cm	9.9 cm	35.3 cm
Nasal (caballete Nasal)	0.46	0.18	0.05
Laríngeo	0.11	0.10	0.02
Orbital derecho	0.14	0.06	0.03
Orbital izquierdo	0.15	0.04	0.05
Mujer, 1.63 m, 59 Kg.	5 cm	10.1 cm	35.5 cm
Pública	0.10	0.04	0.02
Pudental	0.10	0.04	0.02
Umbilical	0.14	0.05	0.02
Abdominal lateral derecho	0.09	0.05	0.01
Abdominal lateral izquierdo	0.05	0.05	---

TABLA 2

**Relación SAR y BMR para un hombre promedio expuesto a una onda plana de 1 y 5 mW/cm<sup>2</sup> de densidad de potencia.**

Frecuencia (MHz)	10	20	50	60	80	100
SAR/BMR (%), 1 mW/cm <sup>2</sup>	0.13	0.6	5.8	16	16	12
SAR/BMR (%), 5 mW/cm <sup>2</sup>	0.65	3.0	29	80	80	60
Frecuencia (MHz)	200	500	1.000	5.000	10.000	20.000
SAR/BMR (%), 1 mw/cm <sup>2</sup>	5.2	3.7	2.9	2.5	2.5	2.5
SAR/BMR (%), 1 mw/cm <sup>2</sup>	26	18.5	14.5	12.5	12.5	12.5

## **Segunda parte**

**BIOFÍSICA DE LAS RADIACIONES Y DOSIMETRÍA:  
ABSORCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA  
DE RADIOFRECUENCIAS EN EL CUERPO HUMANO**

## **1. RESUMEN**

Esta sección del trabajo presenta los problemas y soluciones teórico - experimentales relacionados con los mecanismos de interacción - absorción de la energía de radiación electromagnética por los sistemas biológicos y especialmente, en el ser humano.

Se resuelven, en particular los problemas relacionados con la absorción y la distribución de la energía, teniendo en cuenta diversos niveles de fantasmas simulando al hombre, y se evalúan las respuestas térmicas para distintas configuraciones (tamaño y forma) como una función de la frecuencia de radiación.

Las propiedades dieléctricas de los tejidos son tomadas en cuenta para el cálculo de la dosis y se considera la conducta del agua ligada y libre, en la magnitud de los efectos o daños posibles.

Los diversos sistemas generadores de radiación electromagnética de RF - Microondas son analizados en cuanto a los riesgos posibles y medidas de seguridad.

Se analizan los distintos mecanismos de regulación nerviosa y neuroendócrina relacionados con la capacidad del sistema biológico para disipar calor (termorregulación) y la posibilidad clínica de detectar bioefectos mediante el estudio de las funciones endocrinas a través del seguimiento del flujo hormonal medible.

Finalmente son analizadas las situaciones de las radiaciones de RF- Microondas en prótesis electrónicas (marcapasos) y formas de reducir tales riesgos en los pacientes con tales implantes.

## **2. FUENTES DE RADIACION POR MICROONDAS**

Las fuentes de radiación por microondas que pueden ser causas de riesgo potencial para la salud pueden dividirse, en general, en dos grupos. El primer grupo incluye las fuentes que irradian energía al espacio sea como haz estrecho (por ejemplo: radar) o bien omnidireccional (por ejemplo: emisoras de radio). El segundo grupo incluye aparatos en que la energía de microondas queda confinada dentro de un cierto espacio (por ejemplo: hornos, diatermia).

Es esencial reunir datos integrales sobre los sistemas existentes de radiación por microondas así como evaluar las nuevas aplicaciones para valorar los riesgos potenciales de irradiación. Los desarrollos recientes en fuentes de estado sólido y la consiguiente disminución en el costo ha causado la proliferación de los sistemas de microondas en casas, automóviles, lanchas y aviones privados.

En el campo del guiado y el control podemos anticipar una expansión ulterior de los sistemas de microondas para evitar colisiones y sistemas automáticos de frenado en los vehículos comerciales. Los desarrollos en la tecnología de computadoras, que requieren transmisión de información entre varias terminales, también estimulan una expansión ulterior de sistemas de microondas (1).

En consecuencia, debido a los sistemas existentes y a los nuevos que se agregan, está aumentando el volumen de espacio ambiental en que aparecen niveles medibles de microondas.

Como reconocimiento de la importancia de adquirir conocimientos sobre los niveles de energía radiante generados por el hombre en el ambiente se han destinado recursos sustanciales para la investigación y se ha acumulado una cantidad importante de datos (2-7). Para evaluar los niveles de radiación electromagnética en el ambiente, se desarrolló un sistema automatizado que

permite un análisis de banda estrecha en un amplio intervalo de frecuencias, desde 10 KHz hasta 10 GHz (8).

Con el fin de adquirir un criterio estimativa de problemas potenciales debidos a la radiación ambiental, vale referirse a los datos de los EE.UU. en 1973, que informan sobre el número de fuentes de radiaciones electromagnéticas capaces de producir densidades de potencia entre 10 mW/cm<sup>2</sup> y 0,01 mW/cm<sup>2</sup> a diversas distancias.

El número de fuentes capaces de producir un nivel de radiación de 10 mW/cm<sup>2</sup> a distancias mayores de 1 Km es limitado, pero aumenta espectacularmente para el nivel de 0,1 mW/cm<sup>2</sup> (9).

Esos datos deben ser tomados con alguna reserva (9), teniéndose en cuenta que algunas fuentes, debido a su aplicación y configuración geométrica, no producen los niveles de radiación descritos en lugares accesibles a la gente, por ejemplo, estaciones de comunicación por satélite. Por otra parte, muchas áreas de las grandes ciudades están sometidas a irradiación por fuentes múltiples.

La revisión de varias fuentes de radiación de microondas que aparecen más adelante, tiene por objeto dar una comprensión general de las características básicas de las fuentes que puedan ocasionar daños.

Para evaluar la importancia e impacto de las fuentes debemos tomar en consideración los siguientes factores:

1. Potencial de producción de niveles peligrosos de radiación en condiciones de operación normales y anormales.
2. Número de fuentes en uso.
3. Número aproximado de personas que pueden ser expuestas.
4. Noción del riesgo del personal que trabaja en las cercanías o realiza su mantenimiento (10).

En vista de los resultados de investigación más recientes, factores tales como la frecuencia, la modulación de señal empleada (tipo y frecuencia), la relación máximo - promedio de potencias, así como las condiciones de irradiación (campo lejano vs. cercano), son todos pertinentes en cuanto a la determinación de los riesgos potenciales para la salud creados por la fuente de radiación.

## 2.1. Sistemas de comunicación por satélite

Las terminales terrestres de los sistemas de comunicación por satélite son las fuentes más poderosas de onda continua (OC o CW) de radiación ambiental con microondas (13). Su modo de operar provee la posibilidad de irradiación prolongada de ciertas regiones del ambiente durante el período de rastreo de satélites.

La necesidad de transmitir energía a través de grandes distancias impone una antena de gran diámetro y elevada potencia de transmisión. Ambos requisitos llevan a producir densidades de potencia elevadas sobre distancias extensas.

El parámetro más característico usado para describir tales sistemas es la *Potencia Eficaz Isotrópica Irradiada* (EIRP), que se define como la potencia hipotética total que una fuente de radiación electromagnética debería irradiar isotrópicamente, de modo que la potencia así irradiada por unidad de ángulo sólido resulte igual a la irradiada en forma real.

Las antenas de sistemas de comunicación por satélite son paraboloideas con diseño Cassegrain (doble reflector) Se ha desarrollado un modelo (10, 13) verificado experimentalmente, que permite calcular las densidades de potencia a distancias variables, dentro de los campos cercanos, intermedios y lejanos, para potencia, frecuencia y diámetro de antena dados.

La tabla I, en parte reproducida de (10), muestra las distancias desde las antenas de varios sistemas para los cuales las densidades de potencia son mayores o iguales que los tres niveles especificados (10, 1 y 0,1 mW/cm<sup>2</sup>).

El alcance de campo cercano para una antena de sección circular paraboloide puede hallarse a partir de la ecuación (10):

$$d = \frac{D^2}{5,66\lambda} \quad 2.1$$

donde D denota el diámetro de la antena y  $\lambda$  la longitud de onda de la radiación. La máxima densidad de potencia de campo cercano (sobre eje) es:

$$W_{max} = \frac{16\eta P}{\pi D^2} \quad 2.2$$

donde  $\eta$  es la eficiencia en apertura, comúnmente  $0,5 < \eta < 0,75$ .

Los factores que deben considerarse cuando se evalúa un sistema, en relación con los riesgos potenciales de exposición, incluyen la potencia del transmisor usada en operaciones normales, las características de la antena (incluyendo directividad, ganancia y lóbulos laterales), altura desde el suelo, el ángulo de elevación de la antena y los procedimientos empleados en la operación del sistema.

Un sistema puede producir densidades de potencia importantes y constituir, sin embargo, un riesgo de exposición sólo limitado. A pesar de que los sistemas de comunicación por satélite producen niveles de radiación importantes sobre distancias extensas, el riesgo potencial de exposición para la población es relativamente limitado debido a los siguientes factores:

- Los sistemas están ubicados en áreas escasamente pobladas y son operados por personal entrenado de acuerdo a determinados procedimientos establecidos para minimizar la posibilidad de irradiación.
- Los haces de la antena están bien colimados, y los niveles de radiación fuera del eje disminuyen rápidamente a 0,01 para ángulos mayores que 5 grados (10). Algunos sistemas sólo pueden operar en ángulos de elevación mayores que 7,5 grados por encima del horizonte.

## 2.2. Sistemas de radar

Diversas categorías de radar han sido evaluadas desde el punto de vista del riesgo por irradiación. Existe una gran variedad de sistemas y sus características difieren según su aplicación.

La radiación de radar es por pulsos, y para la mayoría de los sistemas, el ancho de pulso y velocidad de repetición son tales que el promedio de la potencia del transmisor es como mínimo dos órdenes de magnitud menor que el valor máximo. Además, muchas antenas de radar rotan, y por lo tanto el promedio de la densidad de potencia en cualquier dirección queda disminuido.

En general los sistemas de radar pueden ser divididos en dos grupos: uno con gran poder de captación y de rastreo, usado para aplicaciones militares y civiles, y el otro con radares de potencia mediana o baja y de mayor proliferación, tales como los de aviación, de embarcaciones pequeñas y de tránsito. Aunque los niveles de radiación generados por las fuentes del primer

grupo son mucho mayores, el número y el fácil acceso del segundo grupo hacen a éste igualmente significativo como riesgo de exposición.

La *potencia eficaz irradiada promedio* desde el eje de la antena, puede ser calculada mediante la expresión:

$$ERP_{prom} = P_t G \tau f \quad 2.3$$

donde  $P_t$  es la potencia máxima del transmisor,  $G$  es la ganancia de la antena,  $\tau$  es el ancho del pulso y  $f$  es la rapidez de repetición del pulso.

Sí la antena rota:

$$ERP_{prom} = k P_t G \tau f \quad 2.4$$

donde  $k$  es el factor de reducción rotacional. El factor rotacional el campo lejano puede ser determinado como (14):

$$k = \frac{3 \text{ dB ancho del haz}}{\text{ángulo de rastreo}^*} \quad 2.5$$

\*  $360^\circ$  para rotación completa

El valor del factor rotacional para campo cercano depende del tipo de antena. La *distancia eficaz de campo cercano* puede expresarse como (10):

$$R_1 = 0,318 A / \lambda \quad 2.6$$

donde  $A$  es el área de la sección de la antena, y la *densidad máxima de potencia para campo cercano* resulta:

$$W_{max} = \frac{16\eta P}{A} \quad 2.7$$

donde la eficiencia en apertura es:  $0,5 \leq \eta \leq 0,75$

Una evaluación analítica más detallada de los contornos del flujo de potencia para algunas antenas representativas puede ser hallada en (15)

Las distancias calculadas para la densidad de potencia 10, 1 y 0,1 mW/cm<sup>2</sup> de varios radares de elevada potencia están dadas en la tabla II sobre la base de los datos provistos en (10). Debe hacerse notar que para los radares de adquisición de datos las distancias son reducidas aún más significativamente cuando se toma en cuenta el factor de reducción rotacional.

El radar no rotacional de rastreo es generalmente capaz de producir radiación con niveles significativos sobre áreas mayores. Sin embargo, los sistemas con ganancia grande son relativamente pocos y sus ubicaciones remotas, por lo que sólo un número limitado de gente (personal de operaciones) estará expuesto a la radiación.

La distancia es estimada para el nivel 10 mW/cm<sup>2</sup> en varios sistemas de radar (16).

El *radar de aviación* representa adecuadamente las fuentes de potencia mediana, con proliferación relativamente amplia, puesto que cada avión tiene por lo menos uno, y a veces más, como equipo habitual. El intervalo típico de potencia para estos radares es entre 20 y 100 KW de potencia pico y frecuencia de 9.375 MHz ó 5.400 MHz. El tipo de antena que se usa casi exclusivamente es la antena parabólica.

Para este tipo de antena el campo de radiación puede ser dividido en tres zonas. En la zona del campo cercano la densidad de potencia oscila, pero el valor máximo de las oscilaciones permanece prácticamente constante a lo largo del eje de la antena. El campo cercano está seguido por una zona intermedia en la que la densidad de potencia disminuye como  $1/r$  ( $r$  equivale a la distancia desde el centro de la antena). La reducción de ganancia en las regiones cercanas e intermedia fue evaluada analíticamente usando varios modelos (16, 18, 19); Ver volumen I, primera parte.

Se logró un buen acuerdo con los resultados experimentales, usando las siguientes relaciones aproximadas (14):

$R_1 = D^2/5,66 \lambda$	2.8
$R_2 = 2R_1$	2.9
$W_0 = P/A$	2.10
$W_{1f} = 4W_0$	2.11
$W_{2f} = 4W_0 \cdot (R_1/R_2)$	2.12

dónde  $R_1$  y  $R_2$  son las distancias hasta el final de las zonas de campo cercano e intermedio respectivamente;  $W_0$ ,  $W_{1f}$  y  $W_{2f}$  son la densidad de potencia promedio en campo cercano, la densidad de potencia máxima en campo cercano y la densidad de potencia en campo intermedio, respectivamente.

En la tabla III se muestran los resultados experimentales para algunos radares típicos con sus antenas estacionarias.

El examen de estos resultados muestra que para las antenas estacionarias la densidad de potencia puede exceder  $10 \text{ mW/cm}^2$  a distancias de 2 a 4 metros desde el radomo (cúpula de la antena) Generalmente las antenas de aviación son rotatorias, y la exposición promedio disminuye. De todas las antenas de radar y de aviación examinadas, cuando se tomó en cuenta la rotación de la antena sólo pocas unidades examinadas produjeron niveles de radiación que superaron  $10 \text{ mW/cm}^2$  a cualquier distancia (14).

Como conclusión, los radares de aviación que operan en condiciones normales (es decir, sólo en operaciones de vuelo) no producen niveles de radiaciones superiores a  $10 \text{ mW/cm}^2$  sobre grandes áreas pobladas. Las pruebas realizadas demostraron que los niveles de radiación en la cabina del piloto no excedieron  $0,2 \text{ mW/cm}^2$  (17). Por otra parte, pueden existir niveles de densidad de potencia del orden de  $1 \text{ mW/cm}^2$  en algunas salas de espera de pasajeros, si no se suspende el funcionamiento del radar mientras el avión se encuentra en tierra. Además, los reflejos de objetos cercanos pueden introducir irregularidades en el campo de radiación produciendo un aumento de la densidad de potencia en algunos lugares.

Los *radares de marina*, radares de navegación de pequeñas embarcaciones, son otra fuente de niveles de radiación potencialmente riesgosos. La potencia de salida está generalmente limitada a 20 KW valor pico, pero el gran número de unidades en algunas flotas marinas puede provocar la existencia de niveles de radiación importantes. El Bureau of Radiological Health (US) (Dirección de Sanidad Radiológica de los EE.UU.) realizó un estudio de dos localidades donde existe una gran densidad de pequeñas unidades de radar, y se compararon los resultados experimentales con los cálculos teóricos, como se muestra en la tabla IV (20) Debe notarse que los datos que se dan son para antenas estacionarias, mientras que el modo normal de operación es con antena rotatoria.

Los cálculos realizados para distancias de campo cercano, menores que las que se muestran en la tabla IV, llevaron a la conclusión de que ningún tipo de radar salvo tres (se evaluaron más de 40 tipos de radares) produciría densidades de potencia mayores que  $10 \text{ mW/cm}^2$  a distancias correspondientes a los respectivos radios de giro de la antena, aun cuando la rotación de la misma se interrumpa.

Otro tipo de radar muy común es *el de tráfico*, una unidad portátil pequeña usada por las autoridades para determinar la velocidad de los vehículos. Un radar típico consta de una antena bocina cónica, con fuente de potencia de estado sólido que libera hasta 100 mW y opera a una frecuencia de 10,525 GHz. La evaluación teórica y las mediciones fueron realizadas para tipos representativos de estos radares, hallándose una buena concordancia entre los niveles de densidad de potencia medidos en las zonas de campo cercano y lejano; los valores de la zona de campo cercano fueron calculados empleando el método descrito en (11, 21). El estudio (21) concluyó que el radar de tráfico produce niveles de densidad de potencia mayores que  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  a distancias en que normalmente pueden encontrarse personas. Se estimó la densidad de potencia máxima de  $3,6\text{mW}/\text{cm}^2$  a una distancia de 9 cm desde la antena. A 66 cm de distancia desde la antena, la densidad de potencia disminuye a  $0,4 \text{mW}/\text{cm}^2$ .

### 2.3. Transmisores de radiodifusión

Los transmisores de radiodifusión son fuentes de radiación a las que están expuestas potencialmente una elevada cantidad de personas, como resultado directo del papel importante que desempeñan las comunicaciones. Utilizan antenas que generalmente poseen un esquema de radiación omnidireccional en el plano horizontal y haz alineado en el plano vertical. Su número es muy grande y se encuentra en constante aumento (22).

Con frecuencia existen varias estaciones ubicadas en la misma torre que crean condiciones de particular preocupación para los edificios altos cercanos. Otra área de preocupación se refiere al personal de mantenimiento, quien frecuentemente debe realizar trabajos variados en las torres emisoras mientras los transmisores están en operación.

Un amplio programa que apunta a la evaluación de la intensidad de radiación en la vecindad de diversas emisoras y la determinación de intensidades de campo en los lugares más congestionados por emisoras de radio en las grandes ciudades, viene siendo realizado en los EE.UU. desde hace tiempo (6, 7, 10, 22-26). Resumimos en la tabla V (23) algunos parámetros característicos de las emisoras de radio tales como la frecuencia, el máximo de potencia irradiada eficaz permisible y la intensidad de campo eléctrico y la densidad equivalente de potencia de onda plana a nivel del suelo.

La intensidad de campo eléctrico y la densidad de potencia de campo lejano pueden ser calculadas a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{E\alpha \sqrt{30xERP}}{R} \quad 2.13$$

$$W = E^2/377 \quad 2.14$$

donde  $E\alpha$  es la intensidad relativa del campo, la cual es función del ángulo de depresión  $\alpha$  relativo a la horizontal como se muestra en la figura 1, ERP es la potencia efectiva irradiada, R es la distancia desde la antena.

Un esquema típico de irradiación aparece en la figura 2 (23).

Se observa en la figura 2, que la intensidad de campo disminuye rápidamente con el ángulo de elevación. La densidad de potencia a varias distancias y alturas aparece en la figura 3 para 1 mW ERP (Potencia Eficaz Irradiada) en el transmisor (10).

En la práctica, la densidad de potencia en las áreas accesibles a la población es relativamente pequeña (por debajo de  $0,1 \text{mW}/\text{cm}^2$ ). La observación que resulta de las estimaciones teóricas ha sido confirmada por los estudios realizados en la vecindad de varias torres de transmisión en algunas áreas metropolitanas (24).

Como hemos mencionado previamente, las estaciones emisoras pueden constituir un riesgo de irradiación para el personal de mantenimiento de las torres, mientras las emisoras están operando. (Las condiciones de exposición no pueden ser evaluadas teóricamente en este caso, pero algunas mediciones han sido realizadas para una sola estación de FM situada en el monte Wilson, California (22). La estación transmite con potencia eficaz irradiada de 105 KW en los planos horizontal y vertical, la torre tiene 120 pies de alto (36 m) y la antena se encuentra a 80 pies (24 m) por sobre el nivel del piso. La densidad de potencia de 180 mW/cm<sup>2</sup> ha sido determinada en varios lugares de la estructura de la torre).

Estos niveles de exposición son probablemente comunes a las áreas localizadas cerca de las antenas, para la mayoría de las estaciones de FM. Las torres de TV pueden tener también campos de gran intensidad en la zona inmediatamente vecina a las antenas.

#### **2.4. Aparatos emisores de energía de microondas para la producción de calor**

Las aplicaciones de la energía de microondas para la producción de calor son muy diversas y aumentan continuamente tanto en variedad como en número. La aplicación más popular y difundida es la de calentar o cocinar alimentos en escala doméstica o comercial. Otras aplicaciones van desde su uso terapéutico (diatermia en medicina) hasta científico en espectroscopia. Un rasgo característico de todos los aparatos que pertenecen a este grupo es que la radiación debe ser confinada a un espacio limitado inaccesible a la gente. Debido a las limitaciones tecnológicas existe usualmente radiación residual, llamada pérdida (filtración) de radiación, en la proximidad de los aparatos.

La pérdida de radiación máxima permisible de los hornos de microondas está controlada por reglamentos federales en Canadá, los EE.UU. y la mayoría de los países de Europa occidental. El estándar canadiense (27) restringe la pérdida máxima a 1 mW/cm<sup>2</sup> a 5 cm del horno cargado, para todas las clases de hornos, domésticos, comerciales e industriales. El estándar de EE.UU. (28) especifica el nivel máximo de emisión de 1 mW/cm<sup>2</sup> antes de la compra y hasta 5 mW/cm<sup>2</sup> de allí en adelante, aplicable solamente a los hornos domésticos y comerciales para cocina, pero no para las instalaciones industriales. La exposición al horno de microondas es muy pequeña debido al rápido decrecimiento de la densidad de potencia al aumentar la distancia desde el horno.

Para la pérdida máxima del horno de microondas (5 mW/cm<sup>2</sup>) en el peor de los casos, la densidad de potencia a 0,3 m es menor que 0,1 mW/cm<sup>2</sup>, y a 1 m, aproximadamente de 10 μW/cm<sup>2</sup> (29).

Se ha informado sobre niveles considerables de pérdida de radiación en los secadores usados en las industrias textiles, de madera y de plásticos (15 - 40,4 MHz) (30). Para algunas unidades la densidad de potencia equivalente (condición de campo cercano, campo eléctrico y campos eléctrico y magnético efectivos medidos) llegó hasta 260 mW/cm<sup>2</sup> a la altura de los ojos del operador, y 190 mW/cm<sup>2</sup> al nivel de la cintura. Otro informe (31) señala que de las fuentes de espectroscopia excitadas por microondas, la densidad de potencias de 10 mW/cm<sup>2</sup> llega hasta 0,2 m.

Estas fuentes de radiación comprenden un número limitado de aparatos; pero la escasa disponibilidad de datos junto con los ejemplos previamente mencionados de los niveles de pérdida, exige un examen y una evaluación más precisos.

Los aparatos de diatermia por microondas empleados con fines terapéuticos son diseñados para emitir una cierta cantidad de potencia de microondas sobre un volumen limitado de tejido humano. Aparte de la irradiación del área deseada, estos aparatos generalmente producen una pérdida (filtración) de radiación. El nivel de pérdida máximo permisible está restringido a 5 mW/cm<sup>2</sup> en las regulaciones que se han propuesto en Canadá y otros países.

### 3.0. Biofísica - Absorción y distribución de la energía

En el estudio de las interacciones de radiación electromagnética con sistemas vivos, la cantidad física básica que determina el efecto biológico es el campo electromagnético real inducido dentro del cuerpo por el campo electromagnético incidente.

Mientras que la cuantificación de los campos electromagnéticos de varias fuentes en el medio ambiente es compleja, la cuantificación de los campos internos en un medio biológico es en un caso general - una tarea sumamente dificultosa debido a la irregularidad y heterogeneidad de la forma y composición de los sistemas biológicos. Los principales problemas en la evaluación de los campos electromagnéticos del ambiente, desde el punto de vista de los riesgos de exposición, incluyen: existencia de componentes reactivos en campo cercano, interferencias múltiples, cambios de polarización, interacciones entre la fuente y los objetos cercanos, y modulación complicada (12). Los campos internos inducidos en un medio biológico no sólo dependen de la magnitud del campo electromagnético externo, sino también de la frecuencia y configuración geométrica de la fuente con respecto al medio, y de las características del mismo.

Las características básicas de los tejidos biológicos con respecto a la absorción de energía de microondas, se indican a continuación junto con una breve revisión de los métodos analíticos y experimentales disponibles para la evaluación de la absorción y distribución de la energía electromagnética en los objetos biológicos y de las deficiencias de estos métodos.

#### 3.1. Características del medio biológico

Las características de un medio biológico importantes para la determinación de la interacción con los campos electromagnéticos son: forma y dimensiones físicas, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética. En la práctica, todos los materiales biológicos pueden ser considerados no magnéticos; su permeabilidad magnética es igual a aquella del vacío. Por lo tanto, no se la considera en la determinación de la energía EM absorbido.

La permitividad dieléctrica se define:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (\varepsilon' - j\varepsilon'') \quad 3.1a$$

y la tangente de pérdida

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad 3.1b$$

donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad del vacío,  $\varepsilon'$  es la constante dieléctrica relativa (con respecto al vacío) y  $\varepsilon''$  es el factor de pérdida relativo.

La constante dieléctrica define la capacidad del medio para almacenar la energía eléctrica, mientras que el factor de pérdida define las pérdidas de potencia en el medio. En materiales biológicos a frecuencias de microondas, la pérdida de potencia se debe a pérdidas por "fricción" por flujo de carga y rotación dipolar. El factor de pérdida y la conductividad ( $\sigma$ ) se interrelacionan de la siguiente manera:

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad 3.2$$

Cook, Schwan y sus colaboradores (32-41) midieron las propiedades dieléctricas del tejido biológico en un ámbito de frecuencias amplio. Todas las mediciones se refieren a las propiedades *in vitro*. Algunos investigadores (42) cuestionaron la validez de estas mediciones con respecto a las propiedades *in vivo*.

Como los valores de la permitividad compleja determinados *in vitro* son usados en todos los cálculos teóricos, es esencial verificar su validez. Este es uno de los problemas cuya solución es básica para la evaluación de los riesgos por exposición electromagnética (Portela et al. 43).

La permitividad dieléctrica depende del tipo de tejido, contenido de agua, temperatura y frecuencia. Para una mejor ejemplificación en la tabla VI se muestra la permitividad de dos grupos de tejido, uno de alto contenido de agua (piel, músculo), y el otro de bajo contenido de agua (óseo y adiposo) (44).

La permitividad relativa - según puede observarse en la tabla VI- es dependiente de la frecuencia. Se distinguen tres regiones para tejidos biológicos (45). Por debajo de 300 - 400MHz las membranas celulares, que actúan como capas de gran capacitancia y resistencia, se tornan membranas en cortocircuito. A medida que se aumenta la frecuencia, permiten que los contenidos de la célula participen en la conducción de corriente. Las propiedades del tejido están fuertemente influenciadas por el contenido de agua a frecuencias por encima de 4GHz. La frecuencia de relajación para agua es de 20GHz, y en el ámbito de 4GHz hasta aproximadamente 30GHz la permitividad está determinada fundamentalmente por el contenido de agua. En la región intermedia entre 400MHz y 4GHz, las membranas celulares ya no afectan las propiedades del tejido, y la relajación del agua no posee efectos significativos en este ámbito de frecuencias.

Los parámetros dieléctricos también varían con la temperatura. El coeficiente de temperatura de la constante dieléctrica es generalmente menor que el del factor de pérdida.

### 3.2. Onda plana incidiendo en láminas planas de tejido

Las características de la propagación de onda plana en tejidos biológicos de capas planas muestran la forma en que la radiación es absorbida cuando el radio de curvatura de la superficie del tejido es grande en comparación con la longitud de onda.

Este modelo se aplica sólo en la zona de campo lejano de varias fuentes de radiación. La constante de propagación y en un tejido biológico es igual a:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon} \quad 3.3$$

donde  $\alpha$  es la atenuación por unidad de longitud,  $\beta$  es el cambio de fase por unidad de longitud y  $\lambda$  es la longitud de onda en espacio libre.

La longitud de onda en el tejido, determinada a partir de la ecuación (3.3) es:

$$\lambda_t = \lambda / \left\{ \epsilon' / 2 \left( 1 + \sqrt{1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2} \right)^{1/2} \right\} \quad 3.4$$

Como puede verse, es dependiente de la frecuencia y sustancialmente menor que la longitud de onda en espacio libre  $\lambda$ . La reducción de longitud de onda es entre 6,5 y 8,5 para tejidos con alto contenido de agua, y entre 2 y 2,5 para tejidos con bajo contenido de agua (44)

La densidad de potencia absorbida en el tejido (en mW/cm<sub>2</sub>) puede ser calculada a partir de:

$$W = \frac{\sigma}{2} [E]^2 \quad 3.5$$

donde E es la magnitud del campo eléctrico interno (en V/m). La absorción de la potencia de microondas resulta en una reducción progresiva de la densidad de potencia (o la magnitud del campo eléctrico interno) a medida que la onda penetra en el tejido. La *profundidad de penetración* es la distancia que la onda propagada debe recorrer antes de que la intensidad de campo eléctrico

disminuya por un factor de  $1/e$ . La *profundidad de penetración* para algunos tejidos biológicos de alto y bajo contenido de agua se muestra en la tabla VII (44)

La potencia absorbida también es dependiente del coeficiente de reflexión complejo en la interfase de dos medios que tienen diferentes propiedades.

Si se transmite la onda desde un medio (1) con una permitividad  $\epsilon_1$  a un medio (2) con permitividad  $\epsilon_2$  tendiendo a infinito (en la práctica, un valor mucho mayor que la profundidad de penetración), el coeficiente de reflexión (r) puede ser determinado a partir de:

$$\hat{r} = [\tau] \cdot e^{j\theta} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad 3.6$$

Para un modelo plano de capas del cuerpo humano o animal, que consiste en tres capas de tejido diferentes (piel, grasa, músculo) - ver figura 4- con el espesor de las dos capas externas menor que la profundidad de penetración para cada medio, la distribución del campo eléctrico dentro de cada capa depende de los coeficientes de reflexión y del espesor en las dos interfases. Se realizaron cálculos exhaustivos para un modelo que se muestra en la figura 8a (36, 40, 41, 45).

La figura 5 muestra las distribuciones típicas del porcentaje de potencia absorbida en varias capas (45). El efecto marcado del espesor relativo de las capas (respecto de la longitud de onda) en la distribución de potencia absorbida se hace evidencia a partir de estas figuras.

La figura 6 ilustra la densidad de potencia absorbida en la interfase del músculo y en una capa de piel de 2 mm de espesor como una función del espesor de la capa de grasa para un nivel de potencia incidente dado a cuatro frecuencias (27,1MHz, 433MHz, 918MHz y 2.450MHz) (44).

La densidad de potencia absorbida pico es siempre máxima en la piel para el modelo de capas planas. Esto no necesariamente da como resultado una temperatura elevada de la piel, debido a factores ambientales, por ejemplo, enfriamiento de la superficie.

### 3.3. Capas de tejido esféricas expuestas a ondas planas

El modelo de tejido plano -según se mencionara anteriormente- no es una aproximación razonable, si la curvatura del tejido es pequeña en comparación con la longitud de onda de la radiación. Para algunas partes del cuerpo en ciertos ámbitos de frecuencias, son más realistas los modelos de capas esféricas o cilíndricas.

Una esfera homogénea con la permitividad del tejido cerebral fue evaluada como el modelo más simple de cabeza humana o animal (44, 46, 47, 48). El análisis computacional de este modelo mostró que existen máximos en la absorción de potencia interna o esquema de calentamiento (*hot spots*). Su posición y magnitud dependen de la frecuencia y tamaño de la esfera. Como se ve en la figura 7, en una cabeza aislada se pueden distinguir dos regiones (48). En la primera región se produce un calentamiento máximo en la segunda superficie de la esfera, mientras que en la segunda región el calentamiento máximo tiene lugar dentro de la esfera. En la primera región se pueden distinguir dos casos. En el primer caso el tamaño de la esfera es relativamente pequeño en relación a la longitud de onda, y en el otro, en que el radio de la esfera es grande comparándolo con la longitud de onda, muy poca energía penetra en la esfera y el calentamiento máximo ocurre en la superficie frontal.

En la segunda región existen dos fenómenos físicos diferentes, responsables del calentamiento máximo dentro de la esfera. Para un radio de esfera mayor que la longitud de onda dentro del material de la esfera, el campo refractado converge y es enfocado, de manera que pueden aparecer uno o más *hot spots*.

A medida que la frecuencia disminuye y el radio se toma comparable o menor que la longitud de onda dentro de la esfera, la región de máximo calentamiento se traslada hacia la superficie de la esfera.

También se ha realizado un análisis para esferas de músculo, obteniéndole resultados cualitativamente similares (49).

Numerosos investigadores probaron un modelo de multicapas esférico (ver figura 8b) y se calculó la distribución de densidad de potencia a frecuencias específicas para determinados tamaños de esferas (50, 53). En la figura 9 se muestra una comparación de los resultados obtenidos para una esfera de multicapas, esfera homogénea, piel de capas planas y cerebro de capas planas (52).

La *sección eficaz de absorción diferencial normalizada* se define como la potencia absorbida por unidad de volumen por unidad de potencia incidente. Para la configuración, mostrada, puede verse que para la esfera de 10 cm de diámetro, el calentamiento máximo siempre ocurre en el frente de la superficie. Para la esfera de 5 cm de radio, se produce un *hot spot* en el ámbito de frecuencias de 400 MHz a 2800 MHz.

Se desarrolló un modelo de multicapas esférico más sofisticado, de la cabeza (54). Este modelo consiste de un núcleo cerebral esférico central, rodeado de cinco capas concéntricas: fluido espinal del cerebro, membrana, hueso, grasa y piel. Se computó la densidad de potencia absorbida en función de la frecuencia para un radio de cabeza y de núcleo cerebral de 6,6 cm y 5,4 cm, respectivamente. A 100 MHz, una cabeza de este tamaño no altera esencialmente el campo de onda incidente, y se absorbe una cantidad de potencia mínima. A 433 MHz se deposita una cantidad pequeña de potencia en las capas anteriores y posteriores de la cabeza (figura 10a). A 915 MHz, además de la entrega de potencia en la parte anterior y posterior, aparece una región de mayor entrega de potencia (*hot spots*) en el centro de la cabeza (figura 10b). Las figuras 10c y 10d muestran la distribución a frecuencias de 2.450 MHz y 5,8 GHz, donde se puede ver que el depósito de energía en el centro de la cabeza disminuye a medida que la frecuencia aumenta, para ese tamaño.

En la figura 11 se ilustran los efectos del tamaño de la cabeza con respecto a la longitud de onda de la radiación. En ella vemos la densidad de potencia absorbida normalizada para cuatro radios de cabeza a una frecuencia de 3 GHz. Los resultados indican grandes aumentos en la absorción de potencia a medida que las dimensiones de la cabeza se vuelven comparables a la longitud de onda interna (1,5 cm).

La distribución de densidad de potencia absorbida también es fuertemente dependiente de las propiedades dieléctricas de todas las capas -según se indica en (54) mediante cálculos ilustrativos- siendo la dependencia más pronunciada para la constante dieléctrica que para el factor de pérdida.

Como conclusión, la distribución de potencia absorbida dentro de un modelo esférico multicapas de cabeza humana (o animal), expuesta a la radiación electromagnética de onda plana simple depende del tamaño de la cabeza, frecuencia de radiación y propiedades dieléctricas de las capas de tejido. No obstante la simetría esférica del objeto, la absorción depende de la orientación respecto a la dirección de la polarización del campo eléctrico. La absorción en las capas del frente, generalmente es mayor que en otras regiones.

La absorción de potencia depende del radio en relación a la longitud de onda. Para un radio constante la absorción aumenta con la frecuencia, alcanzando el máximo a una frecuencia para la cual las dimensiones son comparables con la longitud de onda interna. Un nuevo aumento en la frecuencia da como resultado una disminución de la absorción de potencia. La absorción máxima en la capa exterior ocurre a frecuencias mayores que la absorción máxima en la interior. Para determinadas dimensiones de cabeza y propiedades dieléctricas, existe una región de gran

densidad de potencia absorbida (*hot spots* o puntos calientes), pero el máximo del centro es el más fuerte.

Un valor preciso de la constante dieléctrica, y en menor medida, del factor de pérdida, es esencial para la determinación de la potencia absorbida y de su distribución dentro de la cabeza. A pesar de que el modelo multicapas presentado permite un cálculo de la distribución de potencia bajo varias condiciones, no se debería dejar de tomar en cuenta sus limitaciones con respecto a situaciones reales de geometría de una cabeza irregular, y presencia de otros objetos cercanos (el cuerpo).

### 3.4. Modelos elipsoidal y esferoidal prolato de hombre y animales

Un elipsoide o un esferoide prolato puede ser considerado como un modelo más realista para describir a un hombre o animal en la interacción con ondas electromagnéticas.

Estos modelos, que tienen permitividad dieléctrica promedio homogénea, han sido evaluados analíticamente (55-63) y experimentalmente (64-70). El esfuerzo ha sido dirigido hacia la determinación de la potencia total absorbida o del régimen de absorción específica, SAR, en W/kg (con la densidad de potencia incidente como parámetro) en un ámbito de frecuencias amplio, para varias orientaciones de esferoides y elipsoides, bajo condiciones de iluminación de onda plana. Las técnicas experimentales incluyeron mediciones de la potencia total absorbida en determinadas partes de los fantasmas de hombre y animal (67,70,71).

En la figura 12 se muestran configuraciones posibles del campo electromagnético y del modelo para un esferoide prolato, donde  $K$  simboliza el vector de propagación cuya magnitud es  $k = 2\pi/\lambda$ .

En la figura 13 se da un panorama general de la potencia total depositada para varias orientaciones del esferoide como una función de la frecuencia (66). Los resultados - tanto analíticos como experimentales - muestran que la potencia total absorbida es una función de la orientación del esferoide con respecto a los vectores de campo de onda plana incidente.

La figura 14 muestra el régimen de absorción específica para una onda incidente de  $10\text{mW/cm}^2$ , como una función de la longitud del esferoide normalizado a la longitud de onda para las configuraciones más absorbentes (68). O sea, con el campo eléctrico ( $E$ ) paralelo al eje mayor del esferoide ( $L$ ), es decir  $E \parallel L$ . Los resultados experimentales obtenidos con varios fantasmas han sido descritos. Se adoptó una altura estándar de  $L_m = 1,75$  m correspondiente a la altura del hombre promedio. En general, se pueden distinguir cinco regiones (68):

- 1) Frecuencias por debajo de la resonancia,  $L/\lambda < 0,2$ ; la potencia absorbida aumenta con la frecuencia como  $f^2$ . Esto también fue deducido teóricamente y verificado experimentalmente por otros investigadores (58).
- 2) Región de subresonancia,  $0,2 < L/\lambda < 0,36$ ; el régimen de entrega de energía cambia como  $f^{2.75}$  a  $f^3$  con la frecuencia.
- 3) Región de resonancia  $L/\lambda = 0,36$  a  $0,4$ . Para un hombre de  $1,75$  m de altura y  $L/2b = 6,34$ , donde  $L/2b =$  es la circunferencia promedio pesada y la frecuencia de resonancia entre  $63$  y  $70$  MHz, el SAR<sub>prom</sub> CE (de cuerpo entero) es entonces de aproximadamente  $2,15$  W/kg para la densidad de potencia de onda plana de  $10$  mW/cm<sup>2</sup>.

Este valor de SAR es equivalente a aproximadamente  $1,8$  del "rate" metabólico basal  $n$  (Régimen metabólico basal).

- 4) Región de supra - resonancia,  $0,4 < L/\lambda < 3,2$ ; la absorción de todo el cuerpo disminuye con la frecuencia como  $f_r/f$ , donde  $f_r$ , es la frecuencia de resonancia.

- 5) Para frecuencias por encima de la resonancia, el *coeficiente de absorción relativa* (definido como una relación de la sección eficaz de absorción de microondas a la sección eficaz física del cuerpo) alcanza asintóticamente el valor 0,5.

El SAR para otras dos orientaciones, es decir el campo H paralelo al eje mayor, y el eje mayor paralelo a la dirección de propagación de la onda, se muestra en la figura 15 (67). En ambos casos las resonancias son menos pronunciadas que cuando el campo E está paralelo al eje mayor, y la frecuencia resonante es mayor y corresponde a aproximadamente  $L/\lambda \simeq 1$  para  $L/2b = 6,34$ . Para frecuencias entre cuatro o nueve veces la frecuencia de resonancia para las configuraciones E, existe relativamente poca diferencia en los regímenes de absorción para las tres polarizaciones. Para el ser humano, esto corresponde a frecuencias entre 250 y 550 MHz.

Se ha realizado un análisis de modelos elipsoidales prolatos de hombre y animales para las frecuencias por debajo de la resonancia (61, 62) El modelo elipsoidal se aplica mejor a situaciones reales que el modelo esferoide. Esto también ha sido confirmado mediante experimentos con animales en los que la rotación de  $90^\circ$  alrededor del eje mayor de los animales produjo diferencias importantes en la absorción de potencia (71).

En la figura 16 se muestran posibles permutaciones en la orientación elipsoidal, con respecto al campo electromagnético.

La figura 17 muestra la potencia absorbida específica promedio vs. la frecuencia, para seis configuraciones de hombre y animales de dimensiones diversas, según se resume en la tabla VIII (62), para una onda plana incidente cuya densidad de potencia es de  $1 \text{ mW/cm}^2$ .

Los resultados de los experimentos con monos vivos, realizados a una frecuencia determinada (40MHz), coincidieron satisfactoriamente con los valores que aparecen en la tabla IX (62).

Por el momento no se dispone de un análisis teórico riguroso para el modelo elipsoidal en la región de frecuencias de resonancia o por encima de ellas.

La distribución de energía electromagnética depositada en los modelos de hombre, fue investigada analítica (72, 73) y experimentalmente (67) Sin embargo, sólo existe una correlación cualitativa de los resultados. Se realizaron investigaciones experimentales de la absorción de potencia y su distribución para cuatro fantomas de hombre en reducción progresiva, de 23,5 a 12,1 cm de altura (67). Los resultados fueron resumidos en la tabla X y en las figuras 18, 19 y 20. Se encontró el "rate" más elevado de entrega de energía para la región del cuello a frecuencias de resonancia y por encima de ellas.

También se ha investigado el efecto del contacto eléctrico con el suelo sobre la absorción en el cuerpo entero (68).

En la figura 21 se muestran los resultados. La frecuencia de resonancia está entre 31 y 34 MHz para un hombre de 1,75 m de altura. En la resonancia, el "rate" de absorción específica<sup>1</sup> es aproximadamente el doble que el de un hombre no conectado a tierra, resultando pues igual a aproximadamente  $4,3\text{W/kg}$  (aproximadamente 2,6 veces el "rate" del metabolismo basal<sup>2</sup>, para iluminación con una onda plana de  $10\text{mW/cm}^2$  de densidad de potencia).

Se produce un aumento de la potencia total depositada cuando se ubica una superficie metálica plana reflectora o un reflector en esquina, cerca del hombre o animal. En la figura 22 se muestran los "rates" de absorción del cuerpo completo en el hombre o animales sometidos a una onda plana de  $10 \text{ mW/cm}^2$  de densidad de potencia. En la tabla XI se da una comparación de la absorción del cuerpo completo bajo diversas condiciones con el "rate" de metabolismo basal<sup>2</sup>, para exposiciones a una densidad de potencia de  $1 \text{ mW/cm}^2$ . La posición de, las superficies

<sup>1</sup> SAR: Régimen de Absorción Específica de Energía

<sup>2</sup> RBM o BRM: Régimen Metabólico Basal.

reflectores en relación con el modelo esferoide de hombre, es elegida de manera que se produzca un aumento máximo.

Es importante notar que las frecuencias de resonancia reales para el hombre y animales pueden ser diferentes como resultado de la relación de aspecto supuesta ( $L/2b \approx 6,3$ ) que no concuerda con los datos reales (ver tabla VIII;  $L/2b \approx 4,5$ ). Además, la forma del cuerpo humano es mucho más complicada que la que se había supuesto para los cálculos. Como han indicado los cálculos para modelos homogéneos y de multicapas de la cabeza, existen diferencias cuantitativas entre los resultados obtenidos para estos modelos, a pesar de que existe acuerdo cualitativo general.

Otro hecho importante que no se debe dejar de tomar en cuenta es que el ámbito de frecuencias resonantes es mucho más amplio que el que se muestra en la tabla XI, cuando se consideran las variaciones en tamaño y geometría en toda una población. Por ejemplo, para un niño de 0,5 m de altura, la frecuencia resonante en el espacio libre calculada es aproximadamente 230 MHz (a partir de la fórmula  $fr \approx [(64)^* \times 1,75/L]$  sugerida por Gandhi en los trabajos (64-69), para un niño de 0,5 m de altura  $fr \approx (64 \times 1,75/0,5) = 224$  MHz.

### 3.5. Modelos varios y condiciones de exposición

El esquema de absorción de energía en modelos cilíndricos multicapas que simulen extremidades del ser humano, fue determinado analíticamente para una exposición de onda plana (74-76), y en condiciones de exposición de campo cercano con las fuentes, de apertura (aplacador) en contacto directo con el tejido (77, 78). Estas investigaciones fueron emprendidas principalmente para determinar las condiciones óptimas de terapia térmica.

Se reconoció la importancia de posibles diferencias en la interacción de campos electromagnéticos pulsados y campos de onda continua, y se han iniciado algunos estudios teóricos (79, 80).

Se halló que para un pulso gaussiano incidente sobre un tejido de capas músculo-hueso, la transmisión del pulso a través del medio depende del ángulo de incidencia y del ancho del pulso.

### 3.6. Métodos de medición - Dosimetría

La determinación de campos electromagnéticos potencialmente riesgosos, la evaluación de los efectos biológicos en animales, y su importancia en relación con la exposición del hombre, requieren que se realice una medición de los campos del ambiente así como también de los campos inducidos en los tejidos expuestos.

Se pueden medir los campos del ambiente mediante varios tipos de monitores disponibles comercialmente. Estos medidores generalmente consisten en un sensor y voltímetro calibrados en unidades de densidad de potencia ( $mW/cm^2$ ). (Ver diagramas 18, 19 y 20.).

El sensor puede comprender, ya sea de tres elementos dipolares eléctricos ortogonales (en algunos casos dos) o tres espiras magnéticas ortogonales (por debajo de 300 MHz), cada uno terminado por una termocupla o diodo de microondas. El sensor está conectado con el voltímetro por medio de cables delgados de alta resistencia. En la zona de campo lejano (iluminación por onda plana) el medidor provee información sobre la densidad de potencia, mientras que en el campo cercano da el cuadrado de la intensidad de campo eléctrico ( $voltio^2/metro^2; V^2/m^2$ ) para el sensor de dipolo E, o el cuadrado de la intensidad de campo magnético ( $ampere^2/metro^2; A^2/m^2$ ) para el sensor de campo H (espiras magnéticas). Algunos medidores sólo emplean uno o dos dipolos o espiras y como resultado, son sensibles a la dirección de los campos medidos. En tales casos, para determinar el campo real, deberían obtenerse dos o tres mediciones (para un sensor

de un elemento) en las direcciones recíprocamente perpendiculares. Se puede hallar una información más detallada de estos medidores en los trabajos (81-85), y en (12) un resumen de las posibles fuentes de error (diagrama 18).

Las mediciones de los campos inducidos y de las temperaturas dentro de los tejidos biológicos no son simples. Se han desarrollado varios métodos e instrumentos con dosimetría perfeccionada para exposición a microondas.

Se desarrolló una punta de prueba implantable aplicada ópticamente, para medir la intensidad del campo eléctrico (86-87). La punta de prueba contiene tres dipolos ortogonales muy pequeños conectados a detectores de diodo. La salida de tensión detectada por cada dipolo es convertida a forma digital para conducir luz a los diodos emisores, cuya salida es entonces transmitida a través de una fibra óptica a un receptor digital. El pequeño tamaño de la punta de prueba lo hace conveniente para el trazado de la distribución del campo eléctrico interno en fantoma y animales experimentales, aunque la sensibilidad ( $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) pueda ser insuficiente en muchos casos (el tamaño de la punta de prueba a que nos referimos es aproximadamente de 3 mm). La unión óptica introduce muy pocas alteraciones (o ninguna) al sistema medido, y no es susceptible a la interferencia de radiofrecuencia. La misma punta de prueba también puede ser usada para detectar el campo eléctrico, la distribución espacial en la zona de campo cercano de las fuentes de microondas, así como también los campos dispersos en presencia de varios objetos reflectores.

Se desarrolló un sistema de fibra óptica con cristal líquido para medir la temperatura del tejido sin alterar el campo electromagnético (88-91) (diagrama 20).

El sensor está compuesto de un cristal líquido de mezcla colestérica encapsulado en el extremo de una punta de prueba de 2 mm de diámetro. El color del cristal cambia en función de la temperatura, y como resultado, también la reflexión de luz desde la superficie del cristal. La luz de un LED es transmitida al cristal y nuevamente al fotodetector en el montaje del medidor a través de un manojo de guías de luz. La punta de prueba opera en un ámbito de temperatura de  $10^\circ$  a  $45^\circ$ , con una precisión de  $0,1^\circ$ .

Cetas (92) desarrolló otra punta de prueba capaz de medir temperaturas alrededor de los  $30^\circ$ , con una precisión de  $0,1^\circ$ . Se emplea un cristal birrefringente como sensor de temperatura y fibra óptica para transmitir las señales de luz. También se sugirió una técnica de detección remota pasiva que usa diodos implantables, para determinar la distribución de campo eléctrico (93). Los diodos no están conectados por cables, y la medición de la intensidad del campo se basa en el espectro de Intermodulación re-radiado por los diodos.

Se ha desarrollado una técnica para la evaluación rápida de la densidad de la potencia absorbida en tejidos de forma y características arbitrarias, utilizando una cámara termográfica (44, 82, 94, 95). Esta técnica, que da una distribución de temperatura de la superficie, es empleada para fantasmas que poseen formas y propiedades dieléctricas simulando tejidos biológicos y partes del cuerpo expuestos a varias fuentes de radiación en los campos cercano o lejano. Después de la exposición, los fantasmas son rápidamente separados, a lo largo de las líneas perpendiculares a las interfases de los tejidos, donde el esquema de absorción de potencia debe ser determinado y entonces se toma una foto mediante la cámara termográfica. Este es un método excelente para obtener esquemas cuantitativos de absorción de potencia bidimensional.

#### **4.0. Mecanismos de Interacción**

La interacción de microondas con sistemas vivientes no sólo depende de la potencia absorbida y su distribución, sino también de la influencia de las reacciones de los mismos sistemas. Un sistema viviente puede considerarse a diversos niveles de organización: molecular, subcelular, celular, orgánico, de sistema de cuerpo entero (42, 96, 99).

Cualquier sistema viviente es autorregulador y homeostático.

Algunos autores dividen las interacciones de microondas con sistemas vivientes en primarias y secundarias (42). Las interacciones primarias se denominan efectos causados por la irradiación de microondas consideradas en términos de absorción de energía y distribución, mientras que los efectos secundarios son el resultado de la interacción primaria. Ambos tipos de efectos pueden ser térmicos en su naturaleza. Por ejemplo, cuando se absorbe la energía de microondas (una interacción primaria), la activación del mecanismo de compensación termorregulatorio es una interacción secundaria (42). En general, las interacciones primarias causan siempre una interacción secundaria o una cadena de interacciones.

#### 4.1. Interacciones macroscópicas

El término interacciones macroscópicas implica que el fenómeno puede describirse en términos de electrodinámica clásica (es decir las ecuaciones de Maxwell), más que por la mecánica cuántica. Una interacción microscópica puede describirse en términos de la potencia absorbida, que a su vez, se determina por la permitividad dieléctrica y la intensidad del campo interno. La tasa de incremento de temperatura es igual a:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = KPv \quad 4.1$$

donde:  $\Delta T$  es el aumento de temperatura en el tiempo  $\Delta t$ ,  $Pv$  es la potencia absorbida en la unidad de volumen y  $k$  es el factor de proporcionalidad dependiente del calor específico y la densidad del tejido.

La transferencia de calor dentro del cuerpo se lleva a cabo por medio de dos mecanismos: conducción y convección circulatoria (100). El proceso de conducción en el cuerpo involucra el flujo del calor a través de los tejidos, debido al gradiente de temperatura.

Los tejidos del cuerpo son conductores térmicos Relativamente débiles, con valores típicos de conductividad entre 8 y 40 J/min. m. °C (2 y 10 cal/min. m. °C).

La convección forzada vía circulación sanguínea es de fundamental importancia en la transferencia de calor a la superficie. En tejidos muy profundos, la transferencia de calor es rápida debido a que las distancias que separan las células de los vasos sanguíneos son pequeñas.

Las diferencias de temperatura que están en el orden de algunos centésimos de grado, están equilibradas por el flujo sanguíneo. El flujo sanguíneo también afecta al aislamiento del cuerpo por medio de la constricción o expansión de los capilares cutáneos, de manera que la distancia que tiene que atravesar el flujo de calor por la capa superficial a la epidermis superficial, aumenta o disminuye correspondientemente. La cantidad de calor transferida del cuerpo al medio ambiente (o viceversa), está controlada por el mecanismo termorregulatorio.

A medida que el calor alcanza la superficie, se va perdiendo al medio ambiente por conducción, convección, radiación, difusión pasiva del vapor de agua a través de la piel y respiración. En contraste con la difusión pasiva, el sudor o "respiración sensitiva" involucra una secreción activa de fluido de glándulas especializadas que están localizadas en la piel. En la pérdida de calor a través del sudor segregado y su tasa de evaporación bajo condiciones normales de reposo, la convección responde por el 40 % de la pérdida de calor total, la radiación por el 45 %, la respiración por el 8 %, la difusión pasiva por el 7 %. Bajo algunas condiciones ambientales (alta temperatura) o fisiológicas (ejercicio pesado), el sudor se transforma en el mecanismo de pérdida de calor dominante. Si la pérdida de calor por sudor no compensa el calor almacenado en el cuerpo, un mecanismo de pérdida de calor evaporativo puede mantener la temperatura interna del cuerpo a niveles de seguridad. En muchos animales esto se lleva a cabo por la evaporación regulada del agua del tracto respiratorio, por leo. El hombre debe confiar en un método eficaz de secreción activa regulada de fluido por glándulas especializadas y su evaporación por la superficie de la piel.

El sudor está controlado por el mecanismo interactivo nervioso central que recibe las señales de los puntos termosensitivos dentro del cuerpo. El hipotálamo y la médula espinal consideran sensores de temperatura centrales equivalentes ya que las señales de sus termorreceptores son aditivas.

Se aplicaron varios modelos de termorregulación humana en la evaluación de los efectos de la absorción de la potencia de microondas. Se concluyó (100) que diferentes modelos de transpiración dan sustancialmente resultados diferentes cuando se los aplica a la absorción de energía de microondas. La disparidad indica una necesidad de nuevos y mejores modelos de transpiración para desarrollarlos antes de que puedan realizarse simulaciones confiables del comportamiento térmico de seres humanos expuestos a la radiación con potencia de microondas.

En general, la absorción de potencia de microondas por parte del tejido (humano o animal), lleva a efectos térmicos que, o bien se compensan por la acción termorreguladora y como resultado de esto la temperatura permanece sin cambio, o están acompañados por un aumento local o total de temperatura.

La distribución no uniforme de la potencia absorbida es un hecho perfectamente establecido que puede llevar a interacciones involucradas. En algunas situaciones de exposición, o ciertas partes del cuerpo absorben potencia de microondas. En (100), se dan nociones sobre los fenómenos posibles. Si se depositan 10 W de potencia en una cabeza (esto corresponde a una exposición de onda plana de  $1 \text{ W/cm}^2$  a 100 MHz), y no se deposita potencia alguna en las partes del cuerpo restantes, se produce solamente un pequeño aumento de la temperatura del tejido interno de la cabeza, ya que está bien protegida por una gran irrigación sanguínea, pero la temperatura del tejido circundante disminuye considerablemente, a causa la transpiración que a su vez es el resultado de un aumento de la temperatura hipotalámica. Cuando por otro lado se depositan 100 W (que es equivalente al "rate" metabólico; al promedio del hombre) en el cuerpo (ninguna potencia en la cabeza), que corresponde a exposición de  $120 \text{ mW/cm}^2$  a 100 MHz o  $590 \text{ mW/cm}^2$  a 20 MHz, no se produce aumento la temperatura hipotalámica, se inhibe el sudor y otros tejidos tienen que aumentar sus temperaturas para facilitar la transferencia de calor.

El calentamiento no uniforme causado por la exposición a radiación de microondas se denomina generalmente formación de "puntos calientes", y puede causar una variedad de interacciones secundarias (42, 97-104). El calentamiento diferencial del hipotálamo puede afectar la termorregulación y producir respuestas fisiológicas aberrantes aun a niveles de densidad de potencia relativamente bajos, que no estén acompañados por un aumento total la temperatura del cuerpo.

La sensibilidad a la temperatura de las neuronas termosensitivas del núcleo preóptico del hipotálamo es tal, que un aumento de temperatura de sólo  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  puede dar como resultado un cambio del 3 % en el "rate" de disparo de tales células (99). Se consideró el efecto de calentamiento con microondas sobre el complejo vestibular-coclear, y se sugirió que los gradientes térmicos dentro de los canales semicirculares del laberinto pueden iniciar una estilación vestibular natural a niveles de densidad de potencia bajos (104).

Los efectos de este tipo son específicos de la frecuencia, debido a la distribución en el espacio, de la potencia dentro de la cabeza, y son dependientes del tamaño y de la frecuencia. Ya que dependen de gradientes o aumentos de temperatura transitorios localizados, relativamente pequeños, se supone que los efectos son reversibles. La naturaleza específica y preliminar de estos mecanismos de interacción sugeridos, no debe pasarse por alto. Los nuevos progresos, tanto en los métodos analíticos y experimentales para determinar la potencia absorbida, y su distribución en cuerpos no homogéneos de hombres y animales, junto con el análisis detallado de los efectos de las situaciones térmicas específicas desde el punto de vista biomédico, deben mejorar la visión de los fenómenos de interacciones macroscópicas.

## 4.2. Interacción microscópica. Mecanismos moleculares

Se puede llevar a cabo la evaluación de los efectos biológicos posibles de la exposición a microondas a bajas densidades, considerando las posibles interacciones moleculares. Algunos efectos moleculares en sistemas biológicos y la energía que se requiere para provocarlos, están resumidos en la tabla XII (99, 105). A través de una frecuencia correspondiente, se indica la capacidad para suministrar la energía especificada (ley de Planck).

La energía de fotones asociada con radiación de microondas está entre  $0,4 \times 10^{-7}$  y  $1,2 \times 10^{-3}$  eV (electrón-Voltio) para frecuencias entre 10 MHz y 300 GHz. El potencial de ionización es aproximadamente  $10^5$  veces mayor que la energía de un fotón de microondas de 3 GHz. Las potencias de campo que pueden producir ionización son tan grandes que la absorción de energía asociada resultaría en una elevación extrema de temperatura, y por lo tanto, este tipo de interacción es prácticamente imposible.

De manera similar, la unión covalente, unión de London - van der Waals (que es responsable de la unión celular específica de los tejidos), o la ruptura de la unión hidrógeno, todos necesitan sustancialmente una energía de activación mayor que las energías del fotón de la radiación con microondas.

Uno de los mecanismos básicos subyacentes a las interacciones de microondas con sistemas biológicos en el nivel molecular, es la rotación inducida por el campo de moléculas polares. Moléculas tales como el agua y las proteínas sufren una cupla de torsión cuando se las coloca en un campo eléctrico, y tienden a alinearse con el campo para minimizar la energía potencial de los dipolos. Como la frecuencia del campo cambia, el punto que alcanza la reorientación depende de las fuerzas viscosas de amortiguación del entorno molecular. De esta manera una molécula polar muestra una frecuencia de rotación crítica, que se denomina *frecuencia de relajación*. Esta frecuencia depende de las dimensiones de la molécula, viscosidad del solvente y temperatura. A la frecuencia de rotación crítica, se produce la transferencia máxima de energía del campo. La energía rotacional se convierte en calor. La interacción rotacional molecular se describe por el comportamiento con la frecuencia de la permitividad dieléctrica, que (desde el punto de vista de la interacción macroscópica), puede considerarse sin tener en cuenta el fenómeno molecular real.

En la región de frecuencias de 10 MHz a 300 GHz, se producen diversos fenómenos de rotación. El agua, que constituye cerca del 72 % del peso total del ser humano, muestra una relajación rotacional a frecuencias de microondas. El agua aparece en dos formas, como agua libre y agua ligada (106). El *agua ligada* se define como moléculas de agua mantenidas en una orientación no aleatoria cerca o en la superficie misma de una macromolécula, en una capa de hidratación de una a varias moléculas de espesor. Mientras que la relajación del agua libre está perfectamente comprendida, algunas de las complejidades del comportamiento del agua ligada no se han resuelto aún. La relajación del agua libre se produce a 20 GHz a temperatura ambiente y tal como se mencionó anteriormente, la frecuencia de relajación es una función de la temperatura. Un aumento de la temperatura provoca un aumento en la frecuencia de relajación. La frecuencia de relajación del agua ligada depende de la molécula, la que se encuentra ligada el agua, y se produce entre los 300 y 2.000 MHz (107).

El fenómeno de relajación dieléctrica se describe más frecuentemente en forma cuantitativa utilizando la teoría de Debye; puede encontrarse más información sobre esta tema en (102, 108).

La excitación rotacional del agua libre en la célula que puede convertirse en excitaciones translacionales y vibracionales, conduce a un aumento en la temperatura celular. Sin embargo no se suponen efectos biológicos específicos de estos mecanismos, ya que la estructura molecular permanece sin cambio (109). A niveles de potencia de microondas elevados, la relajación rotacional del agua libre, puede conducir a alteraciones en la estructura biológica, debido esencialmente al efecto de calentamiento (106). El mecanismo de relajación del agua ligada y sus implicancias biológicas deben ser estudiados más aún (106, 107) pero por el momento no deben

excluirse los efectos específicos. La especulación sobre lo, posibles mecanismos de interacción entre el agua ligada y las microondas, que resulta de la suposición de la similitud entre el agua ligada y el hielo "sembrado" (con impurezas), fue explicado por Vogelhut (110). En este modelo de absorción de potencia de microondas a la frecuencia de relajación o cerca de ella, provoca un cambio de fase de agua ligada a agua libre, en forma similar al cambio de fase hielo-agua a la frecuencia de relajación del hielo.

La excitación rotacional de moléculas biopolímeras tales como proteínas, aminoácidos, hemoglobina y péptidos pequeños, se produce en la región de microondas (0,1-3 GHz). No se prevén efectos biológicos específicos directos para este tipo de mecanismos de relajación (106, 109)

Las rotaciones por segmentos de secciones helicoidales de biopolímeros no aleatorias provocadas por grandes intensidades de campo electromagnético, pueden producir una desviación en el sistema, suficiente para romper el equilibrio. Posiblemente, si las desviaciones del equilibrio se hacen demasiado grandes, pueden llegar a interferir con los procesos replicativos o metabólicos.

Pueden distinguirse tres posibles movimientos internos inducidos, rotación de grupo terminar (-OH, -NH<sub>2</sub>, etcétera), inversiones y deformación del anillo, y "tunneling" del protón (106) No es muy probable que se produzca una transferencia de protón único inducido por el campo en DNA (111). La figura 23 muestra un resumen de las interacciones inducidas por el campo esperadas (106). También se ilustran algunos efectos posibles en las bandas vecinas.

En la región de frecuencias de onda milimétrica por encima, de 100 GHz, pueden producirse mecanismos de interacción moleculares específicos (111).

En este ámbito de frecuencias pueden producirse vibraciones polares de moléculas tales como proteínas y DNA, y pueden dar como resultado hechos biológicamente significativos tales como atracción selectiva de las moléculas o abertura de una sección del complejo DNA.

#### 4.3. Interacciones celulares

Las células consisten en orgánulos y un citoplasma rodeado por la membrana. El núcleo está cubierto por su propia membrana. Además de aislar el interior de la célula, la membrana regula el intercambio de fluidos entre el interior y el exterior, en una forma específica para cada tipo de célula (43, 102)

La capacitancia por unidad de área para un número elevado de membranas es de  $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ , la conductancia de la membrana es 1 a  $10 \text{ S}/\text{cm}^2$ . Las membranas separan regiones de distintas propiedades dieléctricas, de manera que se forman interfases cargadas. Cuando se las somete a campos electromagnéticos de alta frecuencia, muestran un comportamiento de relajación de frecuencia que se denomina efecto Maxwell-Wagner (102, 107). La relajación Maxwell - Wagner se produce entre 10 MHz y algunos cientos de MHz. Las implicaciones biológicas de este fenómeno son similares a la relajación rotacional.

Una excitación de membranas biológicas debe considerarse un mecanismo de interacción importante. Muchos de los trabajos de Schwan están dedicados a este tema (102, 103, 107, 113) Por encima de los 100 MHz, las membranas están en cortocircuito debido a su capacitancia y no puede inducirse ningún potencial eléctrico. Se demostró (102) que cuando un campo eléctrico de algunos V/cm, se aplica perpendicularmente a la membrana que rodea a una neurona, puede formarse un potencial eléctrico de algunos mV (que pueden excitarla), a través de la membrana, para frecuencias inferiores a 1 MHz. Este potencial disminuye rápidamente con la frecuencia, y a frecuencias superiores a los 10 MHz es muy pequeño en comparación con el potencial en reposo de las neuronas. Se hizo una sugerencia importante (105) acerca de la posibilidad de una excitación del nervio a partir de las características rectificadoras de la membrana.

Bajo tales condiciones, puede generarse un voltaje, así como pueden excitarse los nervios. Se supone que los campos electromagnéticos pulsados de longitud de pulso lo suficientemente grande como para excitar al nervio deben producir efectos mayores que los campos continuos de la misma potencia promedio (105). Esta hipótesis no ha sido probada aún.

#### **4.4. Interacción a través de fuerzas inducidas por el campo**

Las fuerzas que actúan sobre las partículas biológicas cuando se las expone a campos alternos, pueden inducir dos tipos de efectos (43, 107, 113, 115): "Formación cadena de perlas", que es un ordenamiento de partículas suspendidas y microorganismos, que resulta de una interacción dipolo-dipolo. La orientación de partículas no esféricas, ya sea perpendicular o paralela al campo, es el resultado de una tendencia a asumir estados de energía potencial eléctrica mínima. Ambos efectos están ilustrados en la figura 24. Tales efectos pueden ser inducidos cuando las fuerzas se toman significativas en comparación a las fuerzas térmicas no aleatorias. Las fuerzas provocadas por campos alternos no tienen posibilidad de ser significativas al nivel molecular y celular, salvo que se apliquen intensidades de campo elevadas (algunos cientos de V/cm). Sin embargo, al nivel celular, se encontró que algunos organismos unicelulares responden a campos del orden de 1 V/cm (107).

#### **4.5. Otros mecanismos de interacción**

En la sección 5 se describe el mecanismo del efecto auditivo de las microondas.

Presman postuló (116) que los campos electromagnéticos de diversas frecuencia, transmiten información biológica entre las diferentes partes componentes del cuerpo humano y animal. Se asume la existencia de algún tipo de intercomunicación entre los componen celulares dentro de la célula, y entre las distintas células dentro de un organismo multicelular. Los organismos individuales son a su vez, sensibles a los campos electromagnéticos el medio ambiente de manera tal que los campos electromagnéticos pueden interferir directamente en las funciones normales de los organismos. Como en otros casos, esta hipótesis ha sido comprobada.

#### **4.6. Consideraciones térmicas en la absorción de ondas, EM**

Para evaluar respuestas de una dosis aplicada de energía de microondas o RF, debe conocerse la relación entre la energía absorbida, los mecanismos de enfriamiento de los tejidos y la temperatura.

Hasta hace poco tiempo, no había un método adecuado que permitiera una dosimetría realista para tejidos expuestos a RF o a radiación de microondas. La densidad de potencia aplicada a la superficie de un animal o preparación de tejido, expresada en  $\text{mW}/\text{cm}^2$  es el parámetro corrientemente usado para obtener una aproximación de la energía absorbida.

Esta medición comúnmente se realiza por medio de una antena receptora de ganancia estándar ubicada en el campo lejano, o calculando el esquema (pattern de densidad de potencia a partir del conocimiento de la potencia liberada de una antena transmisora de ganancia estándar y de la distancia desde esta antena.

El esquema de densidad de potencia cambia cuando el animal o preparación de tejido es colocado dentro del campo. Esto, unido a la reflexión del haz de radiación electromagnética, introduce una duda significativa acerca de los métodos usados en la estimación de la incidencia de potencia sobre la superficie del animal o tejido. La energía absorbida por el animal o preparación de tejido puede ser estimada por métodos calorimétricos.

Las técnicas usuales permiten determinar el nivel de potencia relativo en un sistema de exposición dado, pero no medir la potencia absorbida por el tejido o animal. Como consecuencia de la dificultad en la medición de una densidad de potencia significativa, se hace necesario desarrollar experimentos que permitan un cotejo de los resultados en términos de parámetros que

expresen la potencia absorbida por el animal, órgano, o preparación de tejido específico (es decir, el SAR)

La densidad de potencia incidente en el aire puede ser medida usando sensores isotrópicos de banda ancha, consistentes de tres dipolos ortogonales con detectores de diodo conectados entre los brazos de los dipolos. Las señales eléctricas de los dipolos son conducidas independientemente a través de conductores de resistencia alta, transparentes al campo de microondas (Bowman 1974; Bassen, 1975) (Diagrama 19).

Para intensidades de campo con grandes longitudes de onda en comparación con la longitud de los dipolos, las señales que se detectan de cada elemento ortogonal del sensor de campo son, como ya se ha dicho, proporcionales a  $E^2$ .

Puede ser usado también un sensor compuesto de tres elementos dispuestos en configuración ortogonal. Los elementos son disipativos, y se les transmite calor por irradiación electromagnética. Cada elemento consiste en una serie de termocuplas de película delgada, depositada en sustrato plástico (Aslan, 1972). El sensor es usado cuando la longitud de onda es grande en comparación a la longitud de las cintas de termocupla, y, como la resistencia de éstas es muy grande, las perturbaciones del campo son insignificantes y el calentamiento en cada cinta es proporcional al cuadrado de su componente de campo eléctrico (diagrama 18).

Más aún, pueden ser usadas puntas de prueba piroeléctricas (Huddleston y McRee, 1975) Estas utilizan el efecto piroeléctrico de cristales con polarización espontánea. La polarización espontánea de los cristales depende de su temperatura. Cuando la energía térmica es transmitida a los cristales por campo electromagnético, ésta puede ser detectada por efecto piroeléctrico.

La punta de prueba de cristal líquido (fibra óptica) recientemente desarrollada (Rozzell et al. 1974; Johnson et al.; 1975) puede ser un sensor interesante en la investigación biológica. Su utilidad es la medición de la temperatura en los tejidos expuestos a campos electromagnéticos. Esta punta de prueba es transparente al campo electromagnético ya que no posee componentes metálicos; utiliza fibras ópticas para transmitir la información a y desde la punta sensora, la cual consiste en una delgada película de cristal líquido. La punta sensora que es introducida en el tejido en el punto preciso donde se necesita la información sobre temperatura o dosimetría, está formada por una carga de cristal líquido encerrado en dos "tazas" (a modo de cápsulas) revestidas en "mylar" colocada sobre la punta del paquete de fibra óptica. La mitad de los filamentos de fibra óptica son usados para transmitir luz roja desde un diodo emisor de luz (LED) hacia el material de cristal líquido; la otra mitad conduce la luz roja disipada devuelta al fotodetector (FET). Cualquier cambio de temperatura en los cristales líquidos desplaza el centro de color, resultando un cambio en la retrodispersión de la luz roja (diagrama 20).

Esta punta de prueba tiene la capacidad de medir la verdadera temperatura en los tejidos expuestos a campos electromagnéticos, sin producir cambios en la configuración del campo de los mismos. Otras puntas de prueba térmicas han sido diseñadas, pero aún es necesario perfeccionarlas.

#### **4.7. Interacción de microondas con materiales biológicos**

Con el objeto de comprender algunas de las características de las interacciones de radiofrecuencia y microondas con materiales biológicos, se presenta en la tabla XIII una lista de algunos parámetros de onda importantes.

(Las frecuencias 27, 12, 40, 68, 433, 915, 2.450, 5.800MHz son significativas ya que son usadas en EE.UU. con propósitos diatérmicos, mientras que en Europa -también para diatermia- sólo se autoriza 433 MHz.)

La segunda columna da las longitudes de onda ( $\lambda$ ) en cm y las restantes corresponden a las propiedades de onda en los tejidos. La tabla XIII da los datos para el músculo, piel y tejidos de alto contenido de agua, y para el hueso, grasa y tejidos de bajo contenido de agua. Otros tejidos

intermedios -con respecto al contenido de agua- como por ejemplo: pelo, pulmones, médula, etcétera, tendrán propiedades entre los valores tabulados para los dos grupos ya listados (Johnson y Guy). La tabla enumera las propiedades dieléctricas y la profundidad de penetración en varios tejidos expuestos a ondas electromagnéticas, en función de la frecuencia.

#### 4.8. Propiedades dieléctricas

El comportamiento dieléctrico de los grupos de tejidos indicados en la tabla XIII ha sido evaluado minuciosamente por Schwan y sus colaboradores, y otros investigadores como Cook y Cole.

La integración de los campos de onda electromagnéticos con tejidos biológicos está relacionada con estas características dieléctricas. Los tejidos están compuestos por células limitadas por una membrana que contiene un fluido intracelular compuesto a su vez por diferentes iones, moléculas polares de proteína, y moléculas polares de agua. El fluido extracelular tiene una constitución similar de iones y moléculas polares, aunque algunos de sus compuestos químicos son diferentes.

La acción de los campos electromagnéticos en los tejidos produce dos tipos de efectos diferentes que controlan el comportamiento dieléctrico.

Las características intrínsecas que determinan el grado de interacción entre los campos EM (electromagnéticos) y las bioestructuras están dadas por las propiedades dieléctricas del tejido.

Como no hay materiales ferromagnéticos en los tejidos biológicos, la permeabilidad  $\mu$  del medio es igual a aquella del vacío  $\mu_0$  ( $\mu = \mu' = j\mu'' = \mu_0$ ). La permitividad eléctrica  $\epsilon^*$  del tejido es una magnitud compleja. Es más conveniente utilizar la permitividad relativa  $\epsilon^*/\epsilon_0 = \epsilon' - \epsilon''$ , donde  $\epsilon_0$  es la permisividad del espacio libre,  $\epsilon'$  es la constante dieléctrica y  $\epsilon''$  es el factor de pérdida o disipación del medio. La conductividad eficaz  $\sigma$  (debida tanto a las corrientes de conducción como a las pérdidas dieléctricas) del medio está relacionada con  $\epsilon''$  por:  $\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon''$ , y la tangente de pérdida está dada por  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = \sigma/\omega\epsilon' \cdot \epsilon_0$ , donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la radiación EM ( $2\pi f$ , en cps).

Cuando una onda electromagnética atraviesa un medio,  $\epsilon''$  es una medida de la energía absorbida por ciclo, por el medio. Como la longitud de los ciclos se achica a medida que la frecuencia aumenta,  $\epsilon''$  finalmente disminuirá a cero, a pesar de que la energía total absorbida por el medio es infinita. Por esto,  $\epsilon''$  no es parámetro realista para determinar la absorción de energía; es preferible usar el siguiente parámetro:  $\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon''$  es decir,  $\omega = 2\pi f$ , y  $\sigma = 2\pi f\epsilon_0\epsilon''$ .

Es bien sabido, a partir de la teoría electromagnética, que la energía absorbida por unidad de volumen de un medio, en unidad de tiempo, está relacionada con  $\sigma E$ , donde  $E$  es la intensidad del campo eléctrico. Aún esta expresión no se aplica a microondas que atraviesan un medio absorbente, como lo es un tejido biológico. Esto se debe a que la intensidad del campo no es constante a lo largo del medio, sino que disminuye debido a la atenuación. De este modo, si las microondas con una intensidad de campo eléctrico  $E_1$  son atenuadas hasta  $E_2$  con una amplitud de tejido  $x$ , entonces:  $E_1 = E_2 \exp(-\alpha x)$ , donde  $\alpha$  es el *coeficiente de atenuación del medio* a una frecuencia dada. De manera que la energía absorbida es proporcional a  $\exp(-2\alpha x)$ . A partir de la teoría dieléctrica, la relación entre la atenuación  $\alpha$  y la permitividad compleja  $\epsilon'$  para una onda electromagnética transversal (Transversal Electromagnetic Wave or Mode) (TEM) está dada por:

$$\alpha = \left[ \frac{\omega^{1/2}}{2} \cdot c \right] \times \left[ \frac{(\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2} - \epsilon'}{2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

donde:  $\omega$  = frecuencia angular  $2\pi f$   
 $c$  = velocidad de la luz en espacio libre  
 $f$  = frecuencia de microonda

Esto hace que la relación entre la energía absorbida, frecuencia y permitividad compleja, sea realmente complicada. Cuando  $\alpha$  es pequeña, igualmente  $[\exp(-2\alpha x)]$  tiende a  $2\alpha x$ , que combinado con una aproximación adecuada de la ecuación (3), muestra que la energía absorbida es proporcional a  $\alpha$  en esta situación límite, o proporcional a  $\sigma$ . Esto se corresponde con el extremo de baja frecuencia de la región de dispersión y por lo tanto da una aproximación para el caso bien conocido de un medio entre placas de un condensador, en que la teoría indica que la energía absorbida es proporcional a la conductividad. Sin embargo, en general debe destacarse que el parámetro que determina la absorción de energía es el coeficiente de atenuación  $\alpha$ .

La variación de  $\alpha$  con la frecuencia da una curva delineada en forma similar a aquella que corresponde a la variación de la conductividad con el aumento de la frecuencia.

La relación entre la energía reflejada desde la interfase del medio y los parámetros dieléctricos también es complicada, pero en una primera aproximación, es proporcional a:

$$(\epsilon'^{1/2} - 1)^2 \times (\epsilon'^{1/2} + 1)^{-2}$$

Si la onda es incidente desde el aire.

De manera que en vista de los rápidos cambios de la permitividad compleja a lo largo de la región de microondas para un material biológico es fundamental el conocimiento de  $\epsilon'$  y de  $\epsilon''$ , y luego de  $\alpha$ , para cada frecuencia.

La reflexión parcial de las ondas electromagnéticas tiene lugar en la interfase que separa diferentes medios. La cantidad relativa de, energía total que será reflejada, se determina por la constante dieléctrica y el valor de resistencia específico de los diferentes medios.

La reflexión está caracterizada por un *coeficiente de reflexión complejo* "p", cuya magnitud r determina la cantidad relativa de energía total que será reflejada, y cuyo ángulo de fase  $\phi$  da la demora resultante del proceso de reflexión.

Siempre que el espesor de la capa después de la interfase sea grande en comparación al valor de *profundidad de penetración* para radiación electromagnética, se expresa como:

$$p = r e^{i\phi} = \frac{\sqrt{\epsilon_1^*} - \sqrt{\epsilon_2^*}}{\sqrt{\epsilon_1^*} + \sqrt{\epsilon_2^*}}$$

donde la magnitud r del coeficiente de reflexión es igual al porcentaje de energía reflejada.

Para el caso de tejido adiposo o muscular, es posible mostrar que una gran proporción de la energía total que penetra a través de la grasa subcutánea y llega al tejido muscular, es reflejada. Las ondas reflejadas interaccionan con las ondas incidentes, formando un modelo de onda estacionaria. Una distribución de la intensidad del campo da como resultado:

$$E = E_0 (e^{-\gamma x} + p \cdot e^{\gamma/x}) \quad (2)$$

donde la constante de propagación  $\gamma$  y está dada por:

$$\gamma = j \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{\epsilon^*} = \alpha + j\beta$$

donde:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \frac{60\lambda}{\rho}$$

siendo  $\rho$  la resistencia específica en ohm-cm y  $\lambda$  la longitud de onda de la radiación electromagnética en el espacio libre.

Por consiguiente, aquí se obtiene un *coeficiente de absorción* inversamente relacionado con la profundidad de penetración D:

$$D = \frac{1}{2\alpha}$$

Por lo tanto, se define  $\alpha$  como la parte real de la constante de propagación compleja  $\gamma = \alpha + j\beta$ .

De aquí sigue la ecuación para obtener la energía absorbida por unidad de volumen (equivalente al potencial de calentamiento):

$$P = \frac{E_0^2}{2} \sigma \left[ e^{-\alpha x} + r^2 \cdot e^{2\alpha x} + 2r \cos(2\beta x + \phi) \right] \quad (3)$$

siendo  $\sigma$  la conductividad eléctrica.

La distribución relativa de las fuentes de calor, según fuera representado para el complejo grasa-músculo, no está afectada por la presencia de la capa de piel.

La cantidad  $\varepsilon^*$  será dispersada debido a los varios procesos de relajación, juntamente con los fenómenos de polarización.

En los mamíferos hay dos tipos de tejidos corporales desde el punto de vista de las propiedades eléctricas. Los tejidos pueden dividirse en: tejidos de alto contenido de agua - como músculos, piel, hígado, riñón, sangre -con una constante dieléctrica  $\varepsilon'$  y conductividad  $\sigma$  elevadas; tejidos con bajo contenido de agua -que incluyen grasa y hueso- cuya constante dieléctrica y conductividad son menores. Otros tejidos con cantidades de agua intermedias - como el cerebro, pulmones y hueso medular- tienen la constante dieléctrica entre los tejidos de alto y bajo contenido de agua.

Los valores de estos parámetros eléctricos son correlativos con el contenido de agua en los tejidos, de manera que el primer tipo de tejido puede ser clasificado como tejido de alto contenido de agua y el segundo como tejido de bajo contenido de agua, según fuera indicado más arriba.

La tabla XIII presenta una lista de los parámetros dieléctricos de ambos tipos de tejido versus la frecuencia de 1 MHz a 10 GHz. La *profundidad de penetración* es definida como la distancia que la onda propagada deberá recorrer antes de que la densidad de potencia disminuya por un factor  $e^{-1}$ .

La acción de los campos EM en los tejidos produce dos tipos de efectos asociados con la disipación de energía, con oscilaciones de cargas o iones libres, y rotación de moléculas dipolares como las moléculas de agua o proteína, en correspondencia con la frecuencia de los campos EM aplicados.

El primer efecto produce una pérdida de la corriente de transmisión debido a la resistencia eléctrica; la segunda indica una pérdida de corriente de desplazamiento debido a la viscosidad del medio. Rigurosamente, el factor de pérdida relativo  $\epsilon''$  representa tres formas principales en que la energía es transferida desde el campo eléctrico hacia el cuerpo absorbente. Una es la transferencia de energía cinética a los electrones que no están fuertemente ligados a ningún átomo, y son por lo tanto llamados electrones libres. Estos electrones libres determinan la conductividad de los materiales. Las otras dos formas de transferencia de energía son la fricción asociada al alineamiento de dipolos eléctricos a por el campo E, y la fricción asociada al movimiento de vibración y rotación que E produce en las moléculas. Como  $\epsilon''$  representa la pérdida de energía en el campo eléctrico (E), decimos que una sustancia tiene pérdidas si  $\epsilon''$  es relativamente grande en comparación a  $\epsilon'$  de manera que una sustancia que tiene pérdida absorbe una cantidad relativamente mayor de potencia. En la mayoría de los casos, cuanto más húmeda sea una sustancia, más pérdida tendrá, y cuanto más seca, menos pérdida.

El tejido adiposo contiene menos agua que el muscular, y por lo tanto es menos absorbente que el mismo. Es importante recordar que estas afirmaciones relativas sólo son válidas si el campo eléctrico E en los diversos materiales es el mismo en cada caso; de todos modos, como ya se explicó anteriormente, la permisividad del material también influye en la magnitud del campo eléctrico.

Estos efectos están relacionados con la constante dieléctrica y la conductividad de los tejidos.

El "rate" \* de energía disipada o absorbida por unidad de volumen, o masa de tejido, que resulta de la conducción iónica y de la vibración de las moléculas dipolares en los tejidos, es definido como Régimen de Absorción Específica (SAR: Specific Absorption Rate) \*.

La cantidad total y distribución de la energía EM absorbida en tejidos expuestos a campos EM es una función de varios factores, incluyendo las propiedades dieléctricas de los tejidos, la frecuencia y polarización de los campos aplicados, el tamaño, la forma y orientación del objeto a irradiar y de la fuente de energía EM, la potencia incidente y el tiempo de exposición.

El esquema calórico en el objeto expuesto es luego modificado por las propiedades térmicas de los tejidos, el sistema termorregulatorio. y factores del medio externo.

Cuando diferentes tejidos son expuestos al mismo campo EM aplicado, la absorción de energía en ellos puede diferir en varios grados de magnitud para objetos de diferente tamaño, forma y orientación.

Es por lo tanto importante medir el campo interno y el externo, para cuantificar los efectos biológicos de la radiación EM.

La disminución en la constante dieléctrica  $\epsilon_H$  y el aumento en la conductividad  $\sigma_H$  en tejidos de alto contenido de agua con aumento de la frecuencia, se deben a la polarización interfacial a través de las membranas celulares. Las membranas celulares con una capacidad de  $1\mu\text{F}/\text{cm}^2$ , actúan como capas aisladoras a bajas frecuencias, de manera que las corrientes fluyen en los espacios extracelulares, explicando la baja permitividad de los tejidos. En frecuencias muy bajas, la constante de tiempo de carga es pequeña, como para cargar y descargar a la membrana en un solo ciclo, dando como resultado una alta resistencia capacitiva de tejido, y por ende una alta constante dieléctrica.

Cuando la frecuencia es aumentada, la reactancia capacitiva de la célula disminuye, produciendo un aumento de corriente en el medio intracelular por el aumento en la conductividad total del tejido.

El aumento de la frecuencia impedirá que la membrana celular se cargue totalmente en un ciclo completo, dando lugar a una disminución en  $\epsilon_H$ . A una frecuencia de 100 MHz (o mayor), la reactancia capacitiva de la membrana celular es lo suficientemente baja como para suponer que

las células están en corto circuito. En el rango de frecuencias de 100 MHz a 1 GHz el contenido iónico del medio electrolítico no tiene efecto sobre la dispersión de la constante dieléctrica, de manera que los valores de  $\epsilon_H$ , y  $\sigma_H$  son relativamente independientes de la frecuencia.

Sin embargo, Schwan ha sugerido que las moléculas de proteínas suspendidas con valores más bajos de constante dieléctrica, actúan como "cavidades dieléctricas" en los electrolitos, con lo cual baja la constante dieléctrica del tejido. Atribuye la leve dispersión de  $\epsilon_H$  a la variación de la constante dieléctrica efectiva de la molécula de proteína con la frecuencia.

La disminución final de  $\epsilon_H$  y aumento de  $\sigma_H$  en frecuencias por encima de 1 GHz pueden ser atribuidos a las propiedades polares de las moléculas de agua cuya frecuencia de relajación es de 18-22 GHz aproximadamente.

El comportamiento dieléctrico de los tejidos con bajo contenido de agua es cuantitativamente similar al de tejidos con alto contenido de agua, pero los valores de la constante dieléctrica  $\epsilon_L$  y conductividad  $\sigma_L$  son un orden de magnitud menor, y aún no han sido cuantitativamente comprendidos.

El elevado valor de la constante dieléctrica es debido al efecto de las grandes moléculas dipolares de agua que vibran por causa de las ondas. En otros tejidos con menos agua, los valores están entre 5 y 20.

También hay una gran variación en tejidos de bajo contenido de agua. Como el agua tiene una constante dieléctrica y conductividad altas en comparación a la grasa, la constante dieléctrica y conductividad netas del tejido variarán significativamente con los pequeños cambios que se produzcan en el contenido de agua. Los valores de  $\epsilon$  y  $\sigma$  también variarán con la temperatura. En la región de microondas, donde la dispersión es pequeña, la variación está dada por:

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = 2\%/^{\circ}\text{C}$$

$\epsilon$

y por

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = -0,5\%/^{\circ}\text{C}$$

$\sigma$

Las propiedades dieléctricas de los tejidos juegan un papel importante en la determinación de la potencia reflejada y transmitida en las interfases que separan medios diferentes (tejidos).

También determinan la cantidad total de potencia que un espécimen biológico absorbera cuando se lo ubica en un campo electromagnético.

#### 4.9. Características de propagación y absorción de las ondas

Las características de propagación de la onda plana en capas planas de tejidos biológicos pueden mostrar, al ser analizadas, cómo la radiación es absorbida cuando el radio de curvatura de la superficie del tejido es grande comparado con la longitud de onda. La constante de propagación  $K_{H,L}$  para la transmisión de potencia en tejidos biológicos, puede ser dada en términos de la constante dieléctrica compleja  $\epsilon_{H,L}^*$  y constante de propagación de espacio libre  $k_0$ , en la forma estándar:

$$K_{H,L} = k_0 (\epsilon_{H,L}^* / \epsilon_0)^{1/2} = \alpha_{H,L} - j\beta_{H,L}$$

donde las longitudes de onda

$$\lambda_{H,L} = 2\pi / \beta_{H,L}$$

se reducen significativamente en los tejidos debido a la alta constante dieléctrica. La tabla XIII indica que los factores de reducción son suficientemente grandes: entre 6,5 y 8.5 para tejidos de alto contenido de agua y entre, 2 y 2,5 para tejidos de bajo contenido. Además de la gran reducción de la longitud de onda, habrá una mayor absorción de energía en el tejido, generándose calor.

La densidad de potencia absorbida  $P_{HL}$  que resulta de la conducción iónica y vibración de moléculas bipolares en el tejido está dada por:

$$P_{H,L} = \frac{\sigma_{H,L}}{2} \cdot |E|^2$$

donde E es la magnitud del campo eléctrico. Se puede notar a partir de las conductividades listadas en la tabla XIII que la absorción en tejidos de alto contenido de agua puede ser hasta 60 veces más grande que en aquellos de bajo contenido para los mismos campos eléctricos.

La absorción de potencia de microondas dará lugar a una reducción progresiva de la densidad de potencia de la onda, a medida que las ondas penetran en los tejidos. Esto puede ser cuantificado, definiendo una profundidad de penetración  $D = 1/2 \alpha$  a una distancia que la onda propagada recorrerá antes de la disminución de la densidad de potencia por un factor  $e^{-1}$ .

El "Régimen" de generación de calor en un tejido determinado, varía inversamente al cuadrado de la profundidad de penetración.

Se puede observar a partir de la tabla XIII que la profundidad de penetración para tejidos de bajo contenido de agua puede ser hasta 10 veces más grande que este mismo parámetro para tejidos de alto contenido de agua. Como consecuencia, el calentamiento relativo por microondas en tejidos de alto contenido puede ser 100 veces mayor.

La conductividad eléctrica mostrada en la tabla XIII también puede ser usada como una guía para calcular el calentamiento de tejidos por

$$W_a = 10^{-3} \sigma \frac{|E|^2}{2\rho} = \frac{1}{2\rho} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2$$

donde  $\sigma$  es la conductividad eléctrica en mho/metro,  $\rho$  es la densidad del tejido en  $g/cm^3$ , y E es el valor rms del campo eléctrico (V/m) en el tejido.

Gandhi *et al.*, han informado una importante observación: la fuerte resonancia en la absorción de ondas electromagnéticas por objetos biológicos, cuyos cuerpos han sido expuestos en su totalidad. En el caso de irradiación con onda plana en espacio libre, el régimen más elevado de absorción de energía ocurre en campos polarizados a lo largo del eje mayor del cuerpo ( $E \parallel 1L$ ) y para frecuencias en que la longitud mayor (L) está aproximadamente cerca a 0,4 veces la longitud de onda ( $\lambda$ ) de radiación en espacio libre.

La absorción de energía electromagnética en animales y modelos de hombre con y sin conexión a tierra y efectos de reflexión, han sido estudiados por Gandhi, Hunt y D'Andrea. Curvas generalizadas para absorción de energía electromagnética del cuerpo entero fueron dadas por modelos.

Dado que cada tejido de un sistema biológico complejo - como el hombre- posee permitividades complejas diferentes, habrá en general reflexión de energía entre las diferentes interfases del tejido, durante la exposición a microondas.

El coeficiente complejo de reflexión  $\rho$ , debido a la transmisión de una onda desde un medio con permitividad compleja  $\epsilon_1^*$ , hacia un modelo con permitividad  $\epsilon_2^*$ , y espesor más grande que la profundidad de penetración, está dado por:

$$\rho = re^{j\theta} = \frac{\epsilon_1^* - \epsilon_2^*}{\epsilon_1^* + \epsilon_2^*}$$

Cuando una onda, en un tejido de bajo contenido de agua, incide sobre una interfase con un tejido de alto contenido de agua, que es lo suficientemente grueso (mayor que la profundidad de penetración), la onda reflejada está casi  $180^\circ$  fuera de fase con respecto a la onda incidente, produciendo una onda estacionaria con un mínimo de intensidad cerca de la interfase. Si la onda se propaga en un tejido de alto contenido de agua y es incidente en un tejido de bajo contenido de agua, la componente reflejada está en fase con la onda incidente, produciendo una onda estacionaria con un máximo de intensidad cerca de la interfase. Si hay varias capas de diferentes tejidos con un espesor menor a la profundidad de penetración para cada medio (tejido), la energía reflejada y el modelo de onda estacionaria estarán influidos por el espesor de cada capa y las diversas interfases de onda. Estos efectos pueden obtenerse a partir de las ecuaciones de líneas de transmisión estándar:

La distribución de las intensidades de campo eléctrico  $E$  en una capa dada es:

$$E = E_o [e^{-jkx} + \rho e^{jkx}]$$

donde  $E_o$  es la magnitud pico del campo y  $\rho$  es el coeficiente de reflexión.

La ecuación (3) que define la magnitud de la potencia absorbida en la capa de tejido se fundamenta en esta última expresión.

Schwan ha realizado cálculos extensos de estas distribuciones de absorción en varios tejidos. Las distribuciones típicas están dadas para una onda transmitida a través de la grasa subcutánea hacia el medio muscular.

La densidad de potencia absorbida relativa es normalizada a la unidad, en el músculo, en la interfase grasa - músculo.

Las curvas de absorción relativa que se han mostrado no cambian para un espesor de grasa menor.

La discontinuidad entre la potencia absorbida en el músculo y la de la grasa es totalmente manifiesta. También puede observarse que los pulsos de onda estacionaria se agrandan en la grasa, y la penetración de la onda en el músculo es menor con el aumento de la frecuencia. Esto ilustra claramente la conveniencia de usar frecuencias menores que 2.450 MHz para diatermia (figuras 5 y 6).

La grasa subcutánea puede variar desde 1 cm de espesor hasta 2,5 cm según el individuo.

El calentamiento profundo para diatermia requiere transmisión de energía a través de: esta capa de grasa subcutánea hacia la capa de músculo. El valor absoluto de densidad de potencia absorbida en las capas de tejido depende de la densidad de potencia incidente, espesor de la piel, y de la capa de grasa.

Generalmente se ilustra la densidad de potencia absorbida en la interfase del músculo y la densidad de potencia absorbida pico, en una capa de piel de 2 mm de espesor en función del espesor de grasa, para una densidad de potencia incidente de  $1 \text{ mW/cm}^2$ .

Estos valores pueden ser usados para determinar la potencia absorbida en determinado lugar del músculo y grasa, relacionándolos con las curvas experimentales.

La densidad de potencia absorbida pico es siempre máxima en la capa de piel para el modelo de capas planas. Esto es significativo ya que los receptores térmicos del sistema nervioso están allí localizados e indicarán dolor cuando la densidad de potencia incidente alcance niveles que puedan dañar térmicamente el tejido.

Con el enfriamiento de la superficie de la piel por condiciones naturales del medio externo o por procedimientos clínicos de control, el aumento de la temperatura, sin embargo, puede ser más alto en la grasa o músculo. La absorción pico en los diversos tejidos, puede variar en un rango amplio, con el espesor de la grasa y la frecuencia. Es manifiesto que las frecuencias por debajo de 918 MHz pueden penetrar más profundamente en los tejidos. Lo que esto implica -en términos de peligros de radiación y aplicaciones terapéuticas- es evidente. Existen diagramas que indican las ventajas de frecuencias más bajas para diatermia, que incluyen:

1. Mayor penetración en el tejido muscular
2. Ondas estacionarias menos significativas, y "puntos calientes" en la grasa, y
3. Mejor control y estimación de la energía absorbida para una potencia incidente dada, con una gran variación de espesor de grasa en los diferentes pacientes.

Sin embargo, hay un límite práctico menor con respecto a la frecuencia que puede ser usada. A medida que la frecuencia es disminuida, el tiempo de exposición necesario se agranda, hasta que ya no es posible obtener los esquemas de calentamiento selectivos deseados. Si el tiempo de exposición no es aumentado a medida que la frecuencia disminuye, sólo resultará un calentamiento superficial (Guy y Lehmann; Guy)

La absorción de energía de campo electromagnético está determinada por varios factores. Entre ellos, las propiedades dieléctricas del tejido, el tamaño y forma del objeto a irradiar, la frecuencia del campo EM aplicado, y la orientación del objeto con respecto a la polarización del campo EM pueden influir en el acoplamiento de la energía por varios órdenes de magnitud. Las propiedades eléctricas de los tejidos y de otros sistemas biológicos no sólo controlan el modo de propagación de la energía EM en ellos, sino que también determinan la manera en que los campos EM interactúan con estos materiales biológicos en varios niveles de complejidad.

Así, una descripción cuantitativa de los campos EM en tejidos, y la comprensión de la relación entre esos campos y la termodinámica de los sistemas biológicos, es de importancia básica. Esto último también provee las bases para técnicas de instrumentación útiles, que pueden usarse para determinar la densidad de potencia absorbida y campos inducidos en los tejidos de los sujetos expuestos, simplemente por mediciones de la temperatura.

Uno de los problemas en la investigación de la radiación no ionizante es que los conceptos y enfoques usados en radiación ionizante, han sido generalmente mal aplicados.

A pesar de que los efectos biológicos conocidos de la radiación ionizante son mejor interpretados que aquellos de la radiación no ionizante, el problema de la dosimetría en la no ionizante es muy diferente y mucho más complicado que en la primera.

A diferencia de la radiación ionizante, la misma densidad de potencia incidente medida en el aire puede producir efectos biológicos distintos debido a la diferente absorción, la cual depende de: la frecuencia, configuración de la fuente, tamaño y forma del objeto, polarización del campo, propiedades dieléctricas de los tejidos, orientación del sujeto blanco, etcétera.

Debido a que hay muchas variables que pueden determinar los efectos biológicos de las microondas, el conocimiento de la densidad de potencia absorbida no da suficiente información para hacer una comparación entre los laboratorios que están usando diferentes animales y diferentes enfoques experimentales.

Sin mediciones cuantitativas de la energía o campo real dentro del objeto expuesto, es difícil comparar resultados usando -como ya se dijo- diferentes animales y enfoques experimentales. Ha habido varias discusiones relativas a la elección de los parámetros más significativos a ser medidos. Wachter y Bownman han sugerido usar el cuadrado de la magnitud del campo eléctrico para densidad de energía en los tejidos, para cuantificar acciones.

Schwan propuso el parámetro de densidad de corriente en los tejidos como el más conveniente. Otros investigadores midieron el "rate" de densidad de energía absorbida en el tejido que es definido como Régimen de Absorción Específica (SAR), Sin embargo todos estos parámetros elegidos están directamente relacionados, y por lo tanto no hay diferencias en los resultados reales (Guy, 1975, 1977). Para el estudio de los bioefectos es necesario medir la densidad de potencia incidente en el aire ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ), y el SAR, en los tejidos ( $\text{W}/\text{kg}$ ) Sólo entonces se obtendrá una comprensión total de la interacción de los campos EM con los tejidos; sea en escala microscópica o macroscópica, o en la estructura total del cuerpo; sea el efecto observado "térmico" o "no térmico" en su origen, o meramente un artificio debido a la naturaleza de la aproximación experimental.

Tomando bien en cuenta el tamaño del cuerpo del animal experimental, junto con una dosimetría "in vivo" precisa, los resultados de experimentos en ratas pueden ser relacionados a aquellos obtenidos en experimentos con gatos, monos, perros, ranas o muestras de tejidos "in vitro".

En este trabajo se exponen varios factores que determinan la absorción de potencia de microondas o RF, destacando la complejidad de su respectiva dosimetría.

Se ha sintetizado la instrumentación y técnicas estándar disponibles para medir la potencia incidente y el SAR.

Por lo tanto, para determinar la importancia térmica de una cantidad dada de densidad de potencia absorbida en un tejido, con el objeto de averiguar si un efecto es específico del campo o de la temperatura, o de ambos, debe tenerse en cuenta la relación entre la energía absorbida, los mecanismos de enfriamiento del tejido y la temperatura.

## **5.0. Efectos de RF - Microondas en marcapasos**

El marcapasos es una prótesis diseñada para revertir el bloqueo cardíaco, por ejemplo cuando el nodo A-V no transmite señales eléctricas. Los electrodos internos, directamente conectados al músculo cardíaco, reducen el empleo de corrientes elevadas.

Generadores pequeños de pulsos son implantados debajo de la piel, y las baterías se reemplazan mediante una simple operación.

El efecto de la emisión de radiación RF-Microondas sobre el funcionamiento del marcapaso es conocido. Este efecto depende del tipo de marcapaso y diseño, de la frecuencia, intensidad pico del campo E, ancho del pulso y el de repetición de pulsos (p.r.r.); el marcapaso puede bloquearse o interrumpirse totalmente, volver sobre su modo de rechazo de operación a una interferencia dada. Distintas experiencias fueron presentadas para una amplia variedad de tipos de emisoras instaladas en centros de población en los Estados Unidos. Esos experimentos fueron realizados para determinar sus significancias clínicas, y la posibilidad técnica de diseñar marcapasos para evitar interferencia electromagnética. Se lograron así diseños que aseguraron protección contra la interacción de Campos EM.

Un programa de investigación comprendió también el estudio de tecnologías para disminuir las acciones nocivas producidas por RF - Microondas en los distintos modelos de marcapasos producidos por la industria.

Se han clasificado los marcapasos según dos sistemas:

a) frecuencia fija (asincrónicos),

b) de demanda (sincrónicos, inhibidos por onda - R)

Los del tipo (a) suministran un régimen preestablecido de estímulos eléctricos a los ventrículos, que es independiente de la actividad eléctrica y/o mecánica del corazón. Los marcapasos sincrónicos (o de demanda) "sensan" las despolarizaciones de la actividad cardíaca muscular y producen sus propias señales de despolarización (mediante estímulos eléctricos), únicamente si no se generan las despolarizaciones normales de la actividad bioeléctrica del corazón. Los marcapasos sincrónicos atriales "sensan" la despolarización atrial, retardan la señal para simular el tiempo de conducción normal, y entonces suministran el estímulo eléctrico a los ventrículos (ver figura 25).

Este tipo de marcapaso requiere un electrodo atrial que detecta señales de 2-2,5 mV, correspondiente a la onda - R atrial y dos electrodos ventriculares. El marcapaso es ubicado en el abdomen, y conectado al corazón mediante electrodos (incluye un amplificador de onda - R, un delay, A-V, una unidad de bloqueo lógico y un amplificador de salida) La unidad de bloqueo lógico suministra una salida, en respuesta a la señal atrial a menos que esté ocurriendo fibrilación atrial, en cuyo caso una señal de referencia fija de 52 pulsos/minuto es enviada a los ventrículos.

Los "rates" atriales menores que 52 pulsos/minuto, o bien ondas - R por debajo de la capacidad de sensibilidad del amplificador, resultarán en la generación de pulsos sincrónicos, emitidos por la unidad de bloqueo. Por lo tanto, formas de alteraciones diferentes al bloqueo A-V, serán compensadas por esta unidad marcapaso.

Los marcapasos sincrónicos (inhibidos por onda - R) inhiben su señal de salida cuando estos sensan la despolarización de los ventrículos si sucede naturalmente, por ejemplo, el marcapaso funciona solamente cuando ocurre el bloqueo A -V.

La mayoría de los marcapasos implantados en pacientes son del tipo onda - R. Poseen un circuito de "timing" electrónico que es puesto a cero por despolarización normal o el estímulo marcapaso (figura 25).

Su circuito sensor está programado para responder a señales eléctricas normalmente generadas por el corazón. Pulsos de energía inducidos externamente vía los conductores del marcapaso o circuitos, pueden erróneamente inhibir su señal de salida necesaria para el tejido cardíaco activo. Luego, la interacción de campos RF con marcapasos cardíacos representó un original efecto biológico indirecto. El blindaje de los mismos se logró ampliamente.

Este resulta primariamente del hecho de que los umbrales de interferencia de las corrientes suministradas por el marcapaso comienzan a valores de ondas de 8-10 V/cm, mientras que niveles picos del campo E entre 200 y 600 V/m aproximadamente, pueden estar asociados con campos E pulsados, correspondiendo a densidades de potencias por debajo de 10 mW/cm<sup>2</sup>; por ejemplo el nivel de campo E de una onda continua (CW), 10 mW/cm<sup>2</sup> es del orden de 200 V/m, pero puede ser éste mucho mayor para una fuente de onda pulsada (PW) de bajo cielo activo de trabajo (duty cycle), teniendo la misma densidad de potencia.

Los marcapasos en general, poseen circuitos de eliminación de interferencias eléctricas. No obstante las señales o pulsos electromagnéticos como acabamos de mencionar, con frecuencias de repetición, entre 0,1 Hz y 25 Hz y pulsos de energía eléctrica por encima del nivel umbral de control del marcapaso podían llegar a provocar la inhibición del sistema control del generador de señales del marcapaso, induciendo riesgos y provocando la muerte del paciente portador del mismo.

Se determinó en laboratorio:

1. La susceptibilidad de los umbrales de los marcapasos a campos EM de radiación teniendo "rates" de repetición de pulsos (p.r.r.) suficientes para inducir, o provocar al marcapaso variaciones en su régimen de pulsos preestablecido (onda-R, etcétera)

## 2. Frecuencias, polarización y otros parámetros que alteren su funcionamiento.

Las mediciones efectuadas en los marcapasos conocidos, expuestos a RF - Microondas han señalado que sus performances no son alteradas; Y por lo tanto sus blindajes cumplen con los requisitos de seguridad a radiación EM no ionizante (ejemplos, figuras 25, 26 y 27).

### 6.0. Fisiología de la termorregulación: Neuroendocrinología

Cuando la energía de radiación electromagnética no ionizante de radiofrecuencias interacciona con un organismo la mayor parte de ella se convierte en calor dentro de los tejidos, donde los campos EM están actuando.

El nivel que ha alcanzado la temperatura durante la exposición a la energía EM de RF-MO y el efecto que produce este aumento de la temperatura del tejido - sobre el organismo en su totalidad, pueden depender de la densidad de potencia, de la duración de la exposición a la radiación y de la facilidad con que este calor fluya hacia otras partes del organismo o del medio.

Las consecuencias de este aumento en la temperatura local del tejido pueden ser físicas, fisiológicas o patológicas. Las consecuencias de los cambios en los gradientes térmicos en las propiedades celulares locales y en los sistemas neuroendócrino, cardiovascular y muscular, son analizadas en este trabajo.

Los efectos locales del calor en tejidos y células son complejos ya que virtualmente todo proceso biofísico y bioquímico depende de la temperatura.

Mencionamos sólo dos de los más conocidos y principales efectos:

- Cambios en el nivel del metabolismo celular o del tejido, y
- En la circulación local de la sangre.

Un incremento en el nivel metabólico como resultado de un aumento en la temperatura local, produce un nuevo aumento en el nivel de generación de la energía libre, y es aditivo en sus consecuencias térmicas. El tono vasomotor periférico es regulado por los reflejos, por medio del sistema nervioso central, cuando las condiciones ambientales están cercanas a la termoneutralidad. Sin embargo, en temperaturas de la piel y ambientales bajas, los vasos periféricos tienden a mantenerse contraídos y, con temperaturas de la piel y ambientales elevadas los vasos pueden mantenerse dilatados mediante efectos térmicos locales sobre ellos.

De este modo, excepto en un pequeño ámbito de temperaturas ambientales, en las que los vasos del oído son sensibles al control simpático, las sustancias administradas centralmente y que activan o inhiben otras uniones efectoras termorreguladoras, no producen aparentemente ninguna acción sobre el tono vasomotor periférico.

Similarmente, las alteraciones térmicas locales debidas a la radiación electromagnética no ionizante ejercen un efecto directo en los vasos sanguíneos, periféricos, que los insensibilizan ante cualquier influencia de los centros integrativos neuronales del cerebro.

Principalmente, una alteración térmica actuará sobre los sensores térmicos locales y como reflejo inducirán cambios correctores adecuados, según los patrones e intensidad de las funciones efectoras termorreguladoras. Aparte del tono vasomotor periférico, que puede ser influido particularmente por efectos térmicos directos, éstos comprenden el origen térmico del temblor que aumenta el contenido de calor, o la ausencia del mismo y la pérdida evaporativa del calor mediante el sudor o jadeo que disminuyen el contenido de calor en todo el organismo.

Estas funciones están controladas por procesos reguladores centrales en los núcleos nerviosos de la región hipotalámica, y posiblemente en otras regiones del cerebro. Varios enfoques de investigación están relacionados con la búsqueda de la analogía más cercana al mecanismo por el cual la temperatura del cuerpo y sus procesos reguladores son controlados bajo

una carga térmica sostenida, como la que se produce durante una exposición prolongada a la radiación electromagnética no ionizante (RF-MO)

Este análisis y debate continuo sobre la naturaleza del control y regulación de la temperatura del cuerpo y del efecto sobre la misma del estrés térmico, está relacionado directamente a lo que sucede con la regulación de la temperatura del cuerpo durante la exposición a un nivel de radiación electromagnética no ionizante con efectos termorreguladores reversibles.

La acumulación local del calor, principalmente en los tejidos periféricos, cambia la potencia de salida desde los termosensores periféricos y esto puede cambiar el nivel de la temperatura central (oral o rectal) en la que la producción y pérdida de calor vuelven a su equilibrio.

Cuando la temperatura central de un animal aumenta y permanece en un nivel elevado durante un período prolongado posteriormente a la exposición a RF-MO no existe ningún intento del animal(o aparentemente del sistema controlador) para contrarrestar este aumento en la temperatura central (es decir, las características del proceso termorregulador de los mamíferos han sido igualadas a las de un regulador físico en el que una señal representativa de la variable controlada es comparada con una referencia o señal del "set point")

Una alteración térmica sostenida produce respuesta termorreguladoras, pero el nivel uniforme de la temperatura central puede ser sustituido. Este cambio es interpretado por algunos investigadores como un cambio (desplazamiento) en el "set point" biológico, pero otros discuten en contra de este concepto, y sugieren que la variable controlada puede no ser una temperatura corporal. Una propuesta alternativa es que el proceso regulador es esencialmente el mantenimiento servomecanístico del equilibrio entre la producción y la pérdida de calor. La temperatura central de animales expuestos a la radiación de microondas (10 mW/cm<sup>2</sup> durante 5 horas) aumenta y permanece en un nivel elevado hasta varias horas después de la irradiación. El sistema no contrarresta aparentemente este aumento en la temperatura central (oral o rectal) Cuando se produce una alteración térmica, como la carga calórica, la temperatura del cuerpo no se regula como podría esperarse según la hipótesis del "set point". Un cambio sostenido puede ser el efecto probable de una carga térmica sostenida.

Es difícil afirmar algo respecto a la relación entre la termosensibilidad periférico y la estabilidad de la temperatura central. Más aún, no existe información disponible acerca de la distribución de los sensores de temperatura en los órganos componentes de un sistema biológico, además de esos sensores térmicos de la piel, el hipotálamo y probablemente en la médula espinal. Es muy probable que estos receptores térmicos estén distribuidos a lo largo de todo el sistema. Su presencia no puede ser demostrada por simples técnicas de calentamiento o enfriamiento local. Pero sin embargo, cuando se cambia la temperatura de todo el cuerpo, estos sensores térmicos podrían estar contribuyendo con la entrada: de una señal significativa a los controles centrales. Por lo tanto, sería sumamente peligroso suponer que haya alguna área del cuerpo que no contenga termosensores y que sea insensible a la temperatura.

De manera que el problema depende de que las señales de los diferentes termosensores distribuidos en el cuerpo estén integrados o no. Debe esperarse que, como resultado de la información de señales convergentes, éstas se sumen o multipliquen en forma proporcional al contenido de calor de la estructura en su conjunto, y sean usadas en un sistema de control específico para mantener la relativa uniformidad del contenido de calor del cuerpo. Esto significa que: la señal resultante de varios de los termosensores transmite la información sobre la temperatura del cuerpo y puede contribuir a dar información sobre el contenido de calor del mismo. También parece que el "set point" o señal de salida de la respuesta, mencionado anteriormente, es un indicador del umbral de una estimulación térmica nociva (45°C, por ejemplo) La temperatura del cuerpo humano opera a 37°-38°C mientras que el regulador puede en realidad estar tomando como referencia los 45°C.

Si utilizamos como base los conocimientos generales sobre el tema, sería extremadamente difícil en este momento establecer las características del equilibrio térmico para un animal expuesto a un calentamiento intenso profundo, no uniforme. Los resultados de la investigación

muestran concluyentemente que para frecuencias entre 1,2GHz y 24,5GHz, la exposición a una densidad de potencia de  $100\text{mW}/\text{cm}^2$  durante un período de más de una hora, podría tener efectos térmicos definidos (hipertermia) A densidades de potencia menores que  $10\text{mW}/\text{cm}^2$  las evidencias de cambios patológicos permanentes son ambiguas. Tal vez la investigación básica más importante sobre exposición experimental controlada de seres humanos, a la radiación de RF-MO (2,88GHz, densidades de potencia entre 100 y  $220\text{mW}/\text{cm}^2$ , y una duración de la exposición inferior a una hora) haya sido la que condujera Ely y sus colaboradores. El aumento de la temperatura rectal no indica un aumento en la temperatura promedio del cuerpo; sin embargo, durante la exposición a RF-MO, el sujeto se encuentra en un control térmico normal, con transpiración mínima y sin un aumento de la temperatura promedio del cuerpo.

Los datos que muestran la sensibilidad de las especies a la radiación de RF-MO (como perros, ratas, conejos) indican que no existe correlación entre el área de superficie, peso, o "rate" metabólico basal y la exposición ( $\text{mW}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$ ), necesaria para inducir un aumento de la temperatura rectal de  $1,5^\circ\text{C}$ , lo cual es una función complicada de la densidad y potencia y la exposición.

El tiempo que se requiere para un aumento determinado de la temperatura, no especifica estos factores, pero representa el análisis mínimo del cual debería disponerse en cualquier estudio sobre los efectos de RF-MO. Un hallazgo consistente ha sido el de la sensibilidad del conejo al calor inducido por RF-MO seguido por su muerte después de aproximadamente 3 horas de exposición a una densidad de potencia de  $30\text{mW}/\text{cm}^2$ . Más aún, la sensibilidad térmica de la rata depende de la frecuencia. Desafortunadamente, la rata fue aparentemente el único animal experimentar en el que se ha tomado en cuenta la frecuencia. Es necesario una comparación entre diferentes especies, para continuar las investigaciones en esta área. No se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los aumentos de la temperatura rectal de animales expuestos en 1,2 GHz y 2,88 GHz de radiación RF-MO durante 6 horas, a  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ; se notaron, sin embargo, diferencias en las respuestas subjetivas de los animales, lo que sugiere que la medición de la temperatura rectal puede ser un indicador exhaustivo de la respuesta a la radiación de RF-MO. Es más elevada la temperatura en órganos como el hígado, vesícula biliar, estómago, pulmones, etcétera, que las temperaturas oral y rectal tomadas en forma simultánea después de la exposición.

El problema del calentamiento local o no uniforme adquiere mayor importancia en las interpretaciones de los efectos inducidos por el calentamiento con RF-MO, y debe ser considerado en forma muy cuidadosa para la determinación de los riesgos biológicos relacionados con la observación de los complejos aumentos en la temperatura oral o rectal (temperatura central).

Sin embargo, dada la dificultad en la medición de una densidad de potencia significativa, se realizan experimentos biológicos que permiten una comparación de los resultados en términos de parámetros biofísicos y fisiológicos, que puedan reflejar los efectos de la absorción de potencia electromagnética (EM) por el animal o tejidos, órganos, células, en estudio.

Los cambios en la temperatura central (rectal u oral) son una función complicada de la densidad de potencia, frecuencia, duración de la exposición, condiciones ambientales, y no existe una relación simple entre la duración de la exposición y la densidad de potencia requerida para producir un determinado efecto fisiológico, o sea un cambio en la temperatura oral o rectal (temperatura central).

Se indica la necesidad de una cuidadosa evaluación de la distribución del aumento de la temperatura en los órganos sistémicos de animales sometidos a la exposición de RF-MO (es decir, calentamiento por radiación EM). Esto señala el cuidado que debe tenerse al extrapolar los resultados de la distribución térmica de una especie animal a otra. El papel que juega el régimen del calentamiento, duración de la exposición, área de radiación, profundidad de penetración sobre el fenómeno de calentamiento local, es desconocido. Por lo tanto el modelo de la irradiación con RF-MO debe estar en relación recíproca con el área total del cuerpo, masa orgánica, profundidad, etcétera, y con la posición anatómica del órgano con respecto a la superficie.

Algunos investigadores de la URSS describen la naturaleza térmica y otros autores señalan los efectos de RF-MO específicos no térmicos, en los niveles molecular y celular funcional; en contraste con los estudios realizados en Estados Unidos de América, que generalmente han revelado la respuesta del organismo ante acciones térmicas producidas por la absorción de energía de RF-MO. Se han realizado trabajos significativos en la URSS sobre cambios funcionales transitorios, después de exposiciones menores que  $10 \text{ mW/cm}^2$ . Esa literatura señala que se debe considerar que el sistema nervioso central es moderadamente sensible a los cambios transitorios producidos por radiación.

Esto es especialmente cierto para campos EM y ha conducido a polémicas considerables sobre si los efectos observados en el nivel de sistemas neuronales y de conducta, se deben simplemente al calentamiento (efectos térmicos) o a la estimulación específica de la red neuronal por el campo de radiación electromagnética (efectos no térmicos).

El problema de los cambios en las funciones neuronales debido a RF-MO ha recibido considerable atención.

Algunos investigadores han llegado a la hipótesis de que la radiación de RF-MO altera aquellos mecanismos moleculares relacionados con la función excitatoria.

Otros investigadores han rehusado aceptar la posibilidad de una estimulación nerviosa no térmica, y han considerado una explicación basada en el calentamiento local. Se han realizado experimentos para estudiar los efectos de la radiación EM de RF-MO sobre el sistema nervioso de animales homeotermos y poiquilotermos. Los experimentos de animales homeotermos fueron diseñados para separar los efectos nocivos térmicos de los no térmicos.

Se irradiaron animales poiquilotermos refrigerados, con niveles de potencia de 40-60  $\text{mW/cm}^2$  en varios períodos. Se realizaron además, experimentos en preparaciones de nervios aislados, con la misma longitud de onda y densidad de potencia.

Los resultados de los experimentos en nervios periféricos "in vitro" parecen indicar que los informes anteriores sobre efectos nerviosos pueden explicarse como una consecuencia del calentamiento local de los troncos nerviosos periféricos más que debido a una excitación del sistema nervioso central. El principal efecto observado fue un aumento de la temperatura de la actividad motora del animal irradiado.

Estos experimentos proveen evidencias de que los efectos de RF-MO observados en preparaciones de tronco nervioso aislado, pueden reproducirse mediante un calentamiento no electromagnético equivalente. Sin embargo, estos datos experimentales deben ser revisados, ya que las respuestas bioeléctricas del tronco nervioso dependerán del tiempo (de duración), de la estimulación eléctrica (es decir, duración del pulso, amplitud, etcétera) necesaria para evaluar la excitabilidad de cada uno de los componentes de las fibras del tronco nervioso.

A partir del análisis general de los efectos térmicos en la fisiología y conducta del animal, podemos considerar que no existe hasta el presente una cantidad suficiente de datos que permitan una comparación de los parámetros fisiológicos y biofísicos, que reflejen los efectos posibles como resultado de la absorción de energía EM por animales, o células u órganos específicos del sistema.

Debe realizarse un mayor número de investigaciones en el nivel de órganos y células aisladas para detectar efectos EM y la distribución de potencia localizada, en sitios específicos, que puedan alterar las funciones celulares y subcelulares.

La búsqueda de efectos umbrales en sistemas celulares es la tarea de nuestro trabajo de investigación, antes de aprender sobre los efectos en las respuestas complejas de animales u organismos, donde las interacciones sistémicas pueden compensar, aparentemente, influencias disociadoras de la radiación EM en algunos parámetros específicos, es decir, un número de parámetros dinámicos complejos de membrana, como la constante  $K_r$  (ecuación de cable H - H,

$K_r = 2Ri\theta^2 C_m/a$ ) que no es alterada significativamente por la irradiación - x, aun cuando ellos representan la combinación de otros parámetros que si son alterados (es decir,  $\theta$ ,  $C_m/a$ ), o las constantes  $m_1$  y  $m_3$  de los parámetros mecánicos dinámicos de la contracción isométrica ( $T$ ,  $t$ ;  $T$ ,  $T$ ) de acuerdo a Hill. En todos estos casos de aparente compensación, es muy interesante determinar si los resultados reflejan la operación (intervención) de mecanismos reguladores en la membrana celular (es decir, células nerviosas o musculares excitables), los cuales intervienen para mantener inalterados los diferentes parámetros ante tales influencias disociadoras como son los rayos X o posiblemente la radiación de RF, como así también el aparato contráctil de estas células musculares.

Se ha propuesto que la concentración de  $Ca^{2+}$  en el plasma actúa a través de una retroalimentación negativa para la regulación de la secreción de PTH (hormona paratiroidea).

El estímulo para aumentar la secreción de PTH es una disminución en la concentración de  $Ca^{2+}$  en el plasma por debajo de un umbral.

Otra hipótesis fue agregada, la que incluye el papel de la calcitonina (CT) La elevación de la concentración de calcio ( $Ca^{2+}$ ) en plasma es suficiente para provocar la secreción de CT causando una disminución en la concentración de calcio en el plasma. Esta acción es rápida, mientras que la de PTH ocurre más lentamente y persiste por largo tiempo. Esas hormonas regulan las concentraciones de Ca y  $PO_4$  en plasma dentro de un ámbito muy angosto. El sistema de control se muestra en el diagrama 1. Las hormonas tiroideas juegan un papel importante en el metabolismo del Ca, pudiendo disminuir la calcemia ( $Ca^{2+}$  en el plasma).

El ACTH (adrenocorticotrofina) simultáneamente inhibe la secreción celular de CRH vía un lazo de retroalimentación negativa y estimula sus células efectoras en la corteza adrenal. En los diagramas 2, 3 y 4 sintetizamos el posible mecanismo de regulación de la secreción de ACTH.

El estrés (carga calórica, etcétera) puede provocar una secreción aumentada de ACTH y a la vez una caída de LH y FSH actuando sobre el hipotálamo vía conexiones del sistema nervioso central (SNC). Sabemos que si lo implantamos en el cerebro medio (mesoencéfalo), provoca una reducción en la secreción adrenocortical de corticosterona, que induce descargas en receptores de esteroides presentes en la zona de impulsos eléctricos nerviosos, inhibiendo la liberación hipotalámica de CRH. Demostramos que los extractos conteniendo CRH pueden regular la secreción de ACTH por la hipófisis y que el ACTH implantado en el hipotálamo, reduce el contenido de ACTH de la adenohipófisis, probablemente debido a la inhibición de secreción celular-neurosecretora de CRH.

Los glucocorticoides pueden tener una acción directa sobre la secreción adenohipofisial de ACTH: pueden reducir significativamente el consumo de oxígeno de cultivos hipofisarios, y cuando implantados en la región de la hipófisis, previene la hipertrofia adrenal que ocurre después de provocar la adrenalectomía unilateral.

A pesar de esas indicaciones de la acción directa de los esteroides corticales sobre la hipófisis, el consenso general se inclina a que el sitio primario de acción de retroalimentación es el hipotálamo y quizá otras áreas del SNC. La vasopresina ha mostrado estimular la secreción de ACTH.

La adrenocorticotrofina (ACTH) actúa en tres sitios. Los efectores que primariamente influyen, son las dos zonas más internas de células en la corteza adrenal. Esas capas celulares constituyen el sitio de la síntesis de los glucocorticoides y la secreción. La zona glomerulosa (la capa celular externa de la corteza), que segrega aldosterona, es poco afectada por la ACTH.

También, debemos considerar que afecta los depósitos de grasas, donde ejerce una acción lipolítica en una manera similar a GH, TSH y catecolaminas. Estimula los melanocitos, provocando una hiperpigmentación de la piel, de una manera similar a la MSH.

La corteza adrenal es afectada por la ACTH de varias formas:

1. Causa una reducción en el contenido de ácido ascórbico.
2. Convierte colesterol en glucocorticoides y aumenta sus "rates" de secreción.
3. Aumenta el nivel de la actividad metabólica del tejido adrenal a través de un aumento en el consumo de oxígeno y utilización de la glucosa.
4. Estimula la división celular, de las dos capas interiores y causa que la corteza se hipertrofia.
5. Aumenta la actividad de la adenilciclase y provoca la síntesis de C-AMP, con aumento de la esteroideogénesis proporcional a la dosaje de ACTH. Los inhibidores de síntesis de proteínas bloquean la respuesta a la C-AMP pero no el efecto de la ACTH sobre la concentración de la C-AMP y glucogenólisis.

La regulación de la secreción de la vasopresina puede iniciarse por varios caminos o vías convergentes al hipotálamo (referirse al diagrama 5)

Ya habíamos establecido que una alteración de la presión osmótica plasmática es probablemente el mecanismo de regulación primario. Sin embargo, alteraciones del volumen sanguíneo o presión sanguínea, que activan receptores transductores de variaciones de volumen o presión en el atrio derecho o barocentros de las arterias carótidas, también contribuye al control de la secreción de la vasopresina.

Un aumento en el volumen sanguíneo y la consecuente distribución o estiramiento del atrio derecho provoca diuresis, mientras que una hemorragia, acompañada por una reducción de volumen y presión sanguínea, causa retención de agua. También se aclaró que un *Stress X* que afecte al SNC induce un stress emocional inhibiendo la secreción de vasopresina.

La vasopresina, así como también la occitocina están presentes en la hipófisis posterior.

La liberación de occitocina no es inhibida por la progesterona en la mujer.

Su importancia básica es en la lactancia; en su ausencia no libera leche la glándula mamaria. La eyección de leche ocurre después de la interacción de la occitocina o por la estimulación eléctrica del núcleo paraventricular, el infundibulum o cualquier punto del tracto hipotálamo-hipofisial. La secreción de occitocina puede prevenirse anestesiando el pezón de succión, seccionando la innervación de la glándula, lesionando el núcleo paraventricular, o zonas de la hipófisis (diagrama 6).

La vasopresina y la occitocina pueden causar respuestas similares de diferentes magnitudes. Normalmente, la vasopresina ejerce un efecto antidiurético; en dosis elevadas causa contracción del músculo liso, especialmente en los vasos sanguíneos.

Al presente, la occitocina se considera sólo importante en la preñez y lactancia, donde causa contracción del músculo uterino y eyección de leche.

El mecanismo de su acción en el músculo liso no es conocido; sin embargo la rapidez de su respuesta es considerada dependiente de un fenómeno específico de membrana celular.

La vasopresina manifiesta su acción variando la permeabilidad al agua y urea en los nefrones renales.

La ausencia de vasopresina en mamíferos resulta en la diabetes insípida, una condición que se caracteriza por un consumo elevado de agua y su eliminación en la orina. Una hipótesis que explicaría la acción de la vasopresina (y quizá la occitocina) sugiere que la hormona dispara la actividad del sistema adenilciclase en las membranas celulares. Se basa esta proposición en la observación de que la vasopresina aumenta la concentración de C-AMP en tejidos sensibles a la misma (C-AMP induce efectos similares a la vasopresina como lo hace la teofilina, que protege C-AMP de la destrucción por la fosfodiesterasa).

Cuando la descarga de hormona tiroidea está disminuida, se induce un aumento en la secreción hipofisaria (adenohipófisis) de TSH, indicando que la secreción y/o liberación de TSH está regulada por niveles de hormona tiroidea (diagrama 7).

Un segundo control está constituido por el hipotálamo, que es modulado por:

- a) El nivel de hormona tiroidea;
- b) Señales bioeléctricas nerviosas del hipotálamo anterior vía centros de regulación térmica y temperatura central del sistema. interaccionando con el medio externo, etcétera, y
- c) Señales bioeléctricas nerviosas vía centros de regulación de ingestión de medios nutrientes (fuentes de energía)

Las acciones a, b o c en el hipotálamo transducen incrementos de frecuencias de impulsos bioeléctricos en correspondientes aumentos de TRH → TSH → TH.

Señalamos que agentes que producen stress (calor, frío) provocan respuestas hipotalámicas que liberan TRF, estimulando la hipófisis anterior, produciendo un incremento de actividad, traducida en una mayor secreción de TSH y, por consiguiente, también de la tiroides. La síntesis y secreción de tiroxina aumenta y actúa a nivel de distintos tipos de células (musculares, etcétera) aumentando el metabolismo oxidativo celular y, por lo tanto, del biosistema. Sin embargo, una fracción de hormona tiroidea (señal de control hormonal) regulará este sistema (eje Hipotálamo–Hipófisis-Tiroides, H-H-T), tal como se muestra en diagramas 8 y 9 y la interpretación de las interacciones de la tiroxina y TSH. Un estimulador de duración prolongada (LATS) puede actuar sobre la tiroides, pero su mecanismo de acción no es bien conocido.

Considerando la sensibilidad aparente del SNC de los mamíferos a la irradiación de RF-MO se podría suponer que debido a la íntima relación funcional del SNC con el sistema neuroendócrino, este último sistema sería afectado por stress inducido por irradiación.

El sistema neuroendócrino constituye el regulador primario del metabolismo y crecimiento, funcionando también en las defensas del sistema contra el stress endógeno, así como el de carácter exógeno de largo plazo. Un elemento básico del sistema neuroendócrino, el hipotálamo, es también centro del control térmico. La alteración de la temperatura ("set point") del sistema biológico, ya sea por absorción de energía de RF-MO u otros factores, activaría una respuesta hipotalámica conduciendo a la liberación de hormonas hipofisarias y por lo tanto iniciando una secuencia de eventos. Esto trae aparejado la interacción de otras glándulas endocrinas con los cambios fisiológicos concomitantes, incluyendo la alteración de los niveles de hormonas circulantes en el sistema.

La naturaleza del stress de respuesta neuroendócrina, que es en general una respuesta adaptativa, varía de acuerdo al tipo, magnitud y "rate" del stress.

Esto debe ser tomado en cuenta para la interpretación de los resultados de estudios sobre los efectos de RF-MO en la respuesta endocrino, puesto que respuestas distintas cualitativa y cuantitativamente podrían resultar de variaciones en la intensidad del campo EM, duración de exposición o el modo de fraccionamiento de 1 dosis. Ciertamente, los efectos informados neuroendócrinos por la exposición de RF-MO incluyen inconsistencias, las cuales pueden atribuirse a esos factores, dado que la respuesta neuroendócrina está condicionada por la permanencia de la hormona en sangre.

A continuación se resumen los resultados de trabajos seleccionados sobre efectos neuroendócrinos por exposición a radiación EM de varias frecuencias e intensidades.

Los niveles de hormonas gonadotróficas (en rata) inicialmente aumentan, para luego disminuir durante un período de 18-20 horas posterior a la exposición ( $\lambda = 10$  cm,  $f = 3$  GHz) a la radiación con densidad de potencia de  $10\text{mW/cm}^2$  o mayores, siguiendo una exposición simple de una hora o repetidamente. Las alteraciones en las funciones hipotalámicas quedan indicadas por

los efectos sobre los niveles de FSH y LH, pudiendo provocar perturbaciones y cambios en los ciclos sexuales.

En condiciones dadas, se observa incremento en la liberación de GH, por irradiación (estimulación), y en otros casos, supresión de la liberación de GH. Paralelamente, la función tiroidea, aparentemente se altera transitoriamente por la exposición a RF-MO correspondiendo a una disminución en el PBI y tiroxina en el suero. Los cambios funcionales de la tiroides son típicos del stress térmico, mostrando mediante la técnica de I<sup>131</sup>, un estado hiperfuncional.

El curso temporal de la respuesta de la glándula tiroidea indica un aumento inicial transitorio en el metabolismo debido al efecto calórico. La significancia de la acción sobre el sistema, del aumento inducido térmicamente en la secreción de hormonas tiroideas se está estudiando en los laboratorios.

Las hormonas tiroideas sabemos que provocan el aumento de la actividad metabólica de la mayoría de los tejidos efectores del sistema, cuando se incremento su concentración en la circulación durante un período largo. Tenemos en claro que una retroalimentación negativa de las hormonas tiroideas a nivel de la hipófisis provocaría una reducción del aumento en la actividad tiroidea durante cualquier exposición crónica. No descartemos la posibilidad de que las otras componentes del eje H-H-T podrían ser afectadas por las condiciones de exposición necesarias para generar operaciones en el metabolismo de los carbohidratos, un posible efecto neuroendócrino indirecto de la exposición de RF-MO.

Está bien definido que el eje H-H -T es el sistema neuroendócrino primario responsable del control del régimen ("rate") metabólico.

El diagrama 8 muestra componentes de este sistema, los productos hormonales que sintetizan y liberan, y las retroalimentaciones y caminos directos que constituyen su organización y control.

Puesto que el eje H-H-T responde a variaciones en la temperatura ambiental y sistema, y al stress no específico, la posibilidad de su perturbación por la exposición a la radiación de RF ha sido sospechada en los últimos años.

Experimentos mostraron que el calentamiento por RF-MO localizado en la tiroides aumenta el "rate" de liberación de tiroxina y triyódotironina. Este aumento es relativamente independiente de la estimulación del hipotálamo y la hipófisis.

La secreción de ADH está regulada por el sistema nervioso y depende de las variaciones en la presión osmótica efectiva del líquido extracelular (LEC), de las modificaciones en el volumen del LEC o el comportamiento plasmático y de estímulos exteroceptivos y psíquicos. Drogas tales como la acetilcolina actúan sobre el sistema hipotálamo - neurohipófisis (SHN) para incrementar la descarga de ADH; en cambio el alcohol inhibe la secreción de ADH; la ingestión de grandes cantidades de agua reduce la presión osniótica (concentración) e inhibe la descarga de ADH.

Aceptamos la existencia de determinados receptores que serían sensibles a las diferencias de presión osmótica entre el LEC y el LIC (líquido intracelular). Estos receptores los localizaríamos en el hipotálamo anterior (núcleo supraóptico), y sus estímulos se transmitirían al lóbulo posterior hipofisario, por las vías nerviosas correspondientes.

El efecto de los reflejos nerviosos se superpone al mecanismo básico por el cual las variaciones en la presión osmótica efectiva del LEC alteran la secreción y liberación de la ADH por el SHN.

Estos efectos pueden deberse a la excitación de SHN por stress (dolor, etcétera). El organismo dispone de un mecanismo de retroalimentación negativa capaz de establecer una relación recíproca entre el riñón, el aparato gastrointestinal, los pulmones y las glándulas sudoríparas, por un lado, y el SHN por el otro, asegurando la relativa constancia del líquido

extracelular (LEC) en cuanto a presión osmótica y volúmenes efectivos. O sea, este sistema depende directamente de su conexión con el sistema nervioso central, SNC.

La ADH regula la eliminación de agua libre, y establece un papel en el mantenimiento del balance hídrico. Un incremento en la presión osmótica del plasma actúa sobre los osmorreceptores del hipotálamo, estimulando la secreción de ADH que, a su vez, actúa sobre los riñones y provoca una retención de agua.

Preocupa el análisis del stress, provocado por una exposición significativa a la radiación de RF-MO. Bajo stress, el SNC puede activar el hipotálamo y, secuencialmente, por la vía nerviosa, mediante impulsos bioeléctricos a la médula adrenal.

La secreción resultante de catecolaminas causa una hiperglucemia por un mecanismo similar al evocado por glucagon. La concentración de glucosa en sangre estimula al páncreas, para iniciar la secreción ya sea de la insulina o glucagon, y por los mecanismos conocidos regulan la concentración de glucosa (diagramas 10,11,12). El hipotálamo sintetiza y segrega continuamente PIH, que inhibe la liberación de la prolactina producida en la adenohipófisis (diagramas 12, 13).

La secreción de PIH disminuye en la lactancia. Por lo tanto existiría una relación inversa entre las cantidades de prolactina y PIH segregadas. Esta relación fue observada y correlacionada con la frecuencia de estímulo mecánico de la succión. Cuando se aproxima el período del destete, la frecuencia de succión disminuye y el contenido de prolactina de la hipófisis aumenta, reflejando la secreción disminuida de PIH.

El cuerpo lúteo interrumpe su funcionamiento en la ausencia de prolactina, pero esta acción luteotrópica de la hormona solamente se observa en los roedores. El mantenimiento del cuerpo lúteo funcional en ratas se lo asume como evidencia de secreción de prolactina. Los estrógenos, progesterona y testosterona pueden inducir que el cuerpo lúteo continúe funcionando.

El estrógeno induce secreciones de prolactina por la hipófisis; la testosterona probablemente tiene un efecto dual:

- a) Causando secreción de estrógeno por el ovario, y
- b) Bloqueando la secreción celular - neurosecretora de PIH. El efecto de la progesterona es un ejemplo de una acción de retroalimentación positiva; la producción hipofisaria de prolactina no es afectada por dosis elevadas de esteroides.

La regulación de la secreción de prolactina se presenta en el diagrama 13. Síntesis de la regulación de la secreción de prolactina (luteotrofina):

El problema del control integral de la lactancia está compuesto por requerimientos concurrentes de numerosas hormonas. La secreción de la prolactina es controlada por las hormonas ováricas que actúan sobre el hipotálamo y la adenohipófisis, y por estímulo neuronal de la glándula mamaria. La prolactina que interacciona en la eminencia media bloquea la formación de prolactina en la hipófisis por el aumento de la formación de PIH, que induce atrofia temporal de las glándulas mamarias y cesación de la lactancia; los estrógenos disminuyen la formación de PIH.

Debemos establecer que en el ser humano la LH (gonadotrofina) es la única hormona hipofisaria capaz de estimular la síntesis de progesterona en el cuerpo lúteo. El crecimiento y la maduración de folículos ováricos en mamíferos dependen de la FSH, pero la LH es necesaria para su maduración final. La LH (gonadotrofina) actúa sobre el folículo formado para promover el crecimiento preovulatorio y la secreción de estrógenos.

Una siguiente liberación corta en el tiempo y muy elevada de LH da lugar a la ovulación y a la transferencia del folículo en el cuerpo lúteo. La FSH y LH son ambas necesarias para la producción de estrógeno por el folículo en maduración. Es probable que el estrógeno circulante,

actuando vía hipotálamo, constituya el mecanismo o factor para suprimir la liberación del FSH y facilitar la liberación de LH. La liberación de FRH por parte del hipotálamo - como una función de la frecuencia de los impulsos nerviosos y/o concentración de estrógeno, progesterona, etc., se encuentra íntimamente correlacionada con el estado funcional de la adenohipófisis (FSH en función de FRH) En este modelo se pone de manifiesto que la secreción de LH es efectuada por las células gonadotróficas de la adenohipófisis. Este mecanismo actúa en la misma dirección de control definido por la FSH (es decir: FSH + LH)

Resulta difícil analizar el papel de las gonadotrofinas hipofisarias, FSH o LH, sin considerarlas simultáneamente, ya que la función de una complementa la acción de la otra.

En el hombre, la espermatogénesis sólo es posible si ambas son segregadas simultáneamente, ya que la FSH es necesaria en los estados intermedios del desarrollo del esperma, y la ICSH es necesaria para estimular la secreción de andrógenos imprescindible para la maduración del esperma.

En la mujer la ovulación ocurre solamente si la FSH y la LH son segregadas secuencialmente. La regulación de la liberación de gonadotrofinas en el hombre puede seguir este esquema: los niveles de testosterona en la sangre regularían la actividad de las células neurosecretoras que segregan FRH y LRH. El papel del estrógeno en la fisiología de la reproducción en el hombre no es bien conocido, aunque existan evidencias de que los esteroides sexuales afecten directamente la adenohipófisis. La regulación de la secreción de gonadotrofinas en la mujer es más complicada (ver diagramas 12, 13, 14, 15).

Estímulos tales como los producidos por la ansiedad aumentan la secreción de la aldosterona, pero también pueden elevar la secreción de glucocorticoides. Los factores que regulan y que intervienen pueden ser la ACTH de la pituitaria, la renina del riñón, un efecto estimulante directo del aumento de  $K^+$  plasmático, y posiblemente una disminución del  $Na^+$  en el plasma, actuando sobre la corteza adrenal.

No creemos que los cambios en los niveles electrolíticos del plasma constituyan un mecanismo regulador importante. Pero sí la expresión de una alteración provocada por este tipo de stress.

Partiendo de un incremento de la presión sanguínea renal (y volumen) en el aparato yuxtaglomerular del riñón, se provoca una disminución de la secreción y concentración en sangre de la renina. Por el contrario, la constricción de la arteria renal evoca el incremento en la secreción de la renina transitoriamente en sangre, que actúa sobre una proteína en la fracción globulínica  $\alpha_2$  (se sintetiza en el hígado) de las proteínas plasmáticas, liberando la angiotensina I, que a su vez aumenta su concentración en sangre, y por otro mecanismo la enzima conversiva, actuando sobre ésta, forma mayor cantidad de angiotensina II. Esta última produce (diagrama 16):

1. Constricción arteriolar y un aumento en la presión sistólica y diastólica de la sangre.
2. Su acción vasoconstrictora es 4-8 veces más activa que la norepinefrina.
3. Incrementa la secreción de glucocorticoides y aldosterona por una acción directa sobre la corteza adrenal.
4. El  $K^+$  potencia el aumento de la secreción de la aldosterona y el  $Na^+$  provoca efectos opuestos.

La aldosterona en la etapa siguiente actúa en el nivel del nefrón renal, aumentando la retención del  $Na^+$  y por lo tanto, también la presión osmótica a nivel renal, dando lugar a la disminución de la secreción de renina.

En nuestras investigaciones con poiquiloterms (ranas) hemos demostrado que la exposición a la radiación de RF-MO induce, en el nivel celular, cambios significativos de los parámetros dinámicos relacionados con el comportamiento del agua celular; así como también de los parámetros bioeléctricos activos. El contenido inicial de agua intracelular no varía pero aumenta transitoriamente la permeabilidad al agua y la fracción de agua osmóticamente activa, disponible para el intercambio libre con el fluido extracelular.

Tales cambios transitorios se correlacionan con los observados en las conductancias iónicas y corrientes iónicas (gNa, gK, INa; IK); esos datos han permitido postular formalmente la existencia de un biorritmo anual de la conducta celular del agua (por ejemplo, durante la estación de verano la fracción de agua celular osmóticamente activa y la permeabilidad al agua es mayor que en invierno), que explicaría las diferencias de los efectos transitorios de la exposición a la radiación de RF-MO (efectos biológicos mayores en invierno que en verano). Las mismas deben estar relacionadas a mecanismos celulares específicos de adaptación fisiológica (y hormonal), dependientes de cambios adaptativos, que afectan las propiedades moleculares específicas transductoras de control de las complejas - dinámicas estructuras de las membranas celulares y las regulaciones metabólicas celulares de control.

Los procesos biológicos celulares integrados, no pueden accionar normalmente, a menos que una temperatura relativa constante sea mantenida, sea en el medio ambiental o internamente en el sistema biológico; en este sentido, en los poiquiloterms, las propiedades térmicas del agua son de importancia vital.

Los procesos metabólicos en ranas de la estación de verano dan como resultado la generación de calor, pero debido a los tejidos metabólicamente activos (por ejemplo músculo) que contienen 75 a 80 % de agua, el aumento de la temperatura es minimizado por transporte y por consiguiente siguiendo principios termodinámicos conocidos. Los valores observados en la estación de verano en los parámetros celulares del agua son consistentes con mecanismos de protección en las fluctuaciones térmicas. Por lo tanto, del análisis comparativo de datos de animales colectados en ambas estaciones, y asumiendo que los efectos de la exposición a la radiación de RF-MO, principalmente, resultan de la generación de calor, se infiere que la *menor respuesta* observada a la exposición de RF-MO en la estación de verano es una consecuencia de la habilidad del agua intercambiable para disipar el calor, reforzada por los ajustes de control anual (biorritmo), de los parámetros del agua o comportamiento funcional del agua en los sistemas biológicos, y, particularmente en los poiquiloterms.

Desde 1968, Portela y colaboradores estudiaron los mecanismos posibles de interacción y la consecuente respuesta de sistemas biológicos a la exposición de radiación de RF-MO y la generación de calor y las posibles relaciones con la frecuencia, polarización, magnitud de E y H, etcétera. El comportamiento resultante de la integración de los distintos sistemas de control, tanto endocrino, neuroendócrino como nervioso, de un sistema biológico, que llegan a definir un estado de stress, es complejo.

Como punto inicial de partida, en la diferencia de las respuestas detestables, el comportamiento del agua en el sistema es básicamente importante..

Las respuestas hipotalámicas asociadas con el metabolismo celular vs órganos-comportamiento sistémico (oxidativo, etcétera), y adenohipófisis dinámicamente comunicadas e integradas en el complejo endocrino, conducen a respuestas directas o indirectas del SNC que vía información de señales bioeléctricas de control, juegan un papel importante en la información transmitida por sus mensajeros específicos tales como ADH, occitocina, vasopresina, progesterona, prolactina, angiotensinas, endorfinas,  $\alpha$  y  $\beta$  melatoninas, PIH, variaciones de  $K^+$  y  $Na^+$ , así como también  $Ca^{2+}$ , en la regulación de la presión osmótica plasmática y por lo tanto, en el comportamiento del agua en los distintos procesos que hacen el estado dinámico del control general del intercambio de energía, en la regulación de la temperatura del sistema.

Debemos puntualizar que el sistema biológico está organizado desde el punto de vista de sus mecanismos naturales de detección (sensores, receptores, transductores) para recibir y transmitir información de control íntimamente relacionados con estímulos externos y del medio interno, presentes en la naturaleza. De esta manera se puntualiza la acción termorreguladora del hipotálamo, que por las vías de información establecidas en el sistema determina variaciones de temperatura y establece las formas de ajuste de control térmico. Sin embargo, esa función específica del hipotálamo, compleja en cuanto al mosaico de actividades que cumple, acusa la carga calórica sobre un órgano, principalmente generada por actividades metabólicas íntimamente

relacionadas con el tráfico de señales hormonales que evidentemente el hipotálamo y la neurohipófisis reciben y comparan con la información de señales bioeléctricas.

Es así que cualquier variación de carga calórica (variación de temperatura en cualquier parte del sistema) será acusada por el centro de regulación térmica a través de distintas vías de información.

Pero, cuando analizamos la generación de una carga calórica en el sistema (quedando perfectamente definido, en cualquier órgano o región del sistema) debida a la transformación de energía electromagnética durante la exposición a RF-MO la misma no será acusada por el centro de regulación térmica, por los mecanismos naturales del sistema, introduciendo una alteración en la eliminación de dicha carga.

Nuestra experiencia señala que no existen en el medio interno sensores programados que detecten información de campos electromagnéticos vs. absorción de energía electromagnética, y por lo tanto, una de las propiedades conservativas del sistema en cuanto a una sobrecarga calórica de este tipo, puede controlarse vía respuestas de variaciones de presión osmótica vs. transporte de agua, modulada por mensajeros hormonales. El sistema nervioso participa de ese control complejo vía respuestas en la permeabilidad celular y de redes vasculares transportadoras de carga calórica. No obstante, debemos diferenciar generación de calor por el metabolismo, controlable por el sistema programado para tal fin, y calor, generado por mecanismos no existentes en el sistema.

Para aclarar conceptos, la energía entra al sistema por nutrientes con un valor calórico dependiente de su naturaleza química. La ingestión con respecto al tiempo y cantidad calórica es regulada tal como ya lo detallamos, por el SNC. Esa ingestión y digestión de nutrientes requiere trabajo interno y los mismos se almacenan como carbohidratos, grasas, o como una parte estructuralmente organizada de la masa del sistema (proteínas). (Ver diagrama 17).

El medio nutriente puede ser oxidado para suministrar calor o trabajo como energía de salida del sistema. Pero, todos los procesos de regulación interna son controlados por los sistemas endocrinos y nerviosos y la temperatura del sistema es mantenida, entonces, por una función o funciones de control, donde relaciones de entrada-salida están condicionadas al "set" de estados alcanzables por el sistema (sistema de múltiples variables condicionadas para perturbaciones controlables y no controlables, específicamente por funciones definidas)

Un sistema de múltiples caminos metabólicos, que aparezcan como "shunts", ciclos o reacciones en cascada, ligan las interacciones entre sustratos, enzimas, oxígeno, pero son íntimamente regulados por factores endocrinos (hormonas, etc.) que llevan a la movilización del agua y a la regulación de la presión osmótica, transitoriamente relacionadas.

Concluyendo, este tipo específico de carga calórica implica la puesta en marcha de mecanismos adaptativos para estímulos habituales del medio.

En estas condiciones una carga no común, si bien es posible que ponga en marcha los sistemas hormonales, neuroendócrinos y nerviosos, también es cierto que este proceso produciría desajustes en estas áreas de regulación, y que no sean capaces de elaborar reacciones rápidas y adecuadas al mensaje energético.

La falta de adaptación completa al estímulo no convencional conduciría al organismo a una situación de desajuste.

Para el personal cumpliendo tareas en los sistemas de radares y radiocomunicaciones se sugiere que, en sus chequeos clínicos de rutina, se agregue información complementaria de su estado funcional.

## 7.0. Información adicional que completaría la historia clínica del personal trabajando en RF - Microondas:

### *Antecedentes adicionales*

Recabar cuidadosamente qué manifestaciones clínicas han aparecido últimamente. El interrogatorio será cuidadoso y deben ser consignadas las manifestaciones en la forma que las expresa el paciente (con eventual aclaración del médico)

Hábitos, sueño, diéresis, apetito, ingestión de líquidos, percepciones auditivas, visuales, térmicas, mecánicas, etcétera.

El examen clínico será completo de rutina, pero se pondrá especial atención al examen ocular (lámpara de hendidura), en especial la córnea, agudeza visual u otra variante encontrada con respecto a exámenes anteriores. Audiometría.

En piel: buscar aparición de manchas y zonas pruriginosas con manchas o sin ellas. Eritemas faciales. Fenómenos de Raynaud. En faneras caída del cabello y distribución de la misma.

Boca: sequedad o sialorrea; glositis.

Digestivo: náuseas, vómitos, dolores, catarsis.

Urinario: diéresis, nicturia, capacidad sexual.

Sistema nervioso: parestesia, hiperalgesias, coordinación, etcétera.

Neuropsiquiátrico: insomnio, memoria, etcétera.

Astralgia.

### *Laboratorio*

Rutina completa (hemograma, urea, colesterol, ácido úrico, eritro y otros) Orina: horario de recolección de la muestra (volumen, densidad). En sangre: estudio de enzimas, GOT, GPT, CPK, LDH. Péptidos endógenos que se fijan en los receptores de los opiáceos:

Alfa - MHS

Alfa - endorfina

Beta - lipotrofina, etcétera.

Vasopresina

Occitocina

STH

Prolactina

ACTH

Insulina

Triiodotironina

Pruebas funcionales de reserva hipofisaria, para los operadores de radares o personal sobreexposto que en los estudios básales muestre estados anormales o dudosos.

## **TABLAS Y FIGURAS**

TABLA 1

**Características anticipadas de sistemas seleccionados de comunicación vía satélite<sup>10</sup>**

Sistema	f (GHz)	P(kW)	W <sub>max</sub> (mW/cm <sup>2</sup> )	Distancia en Km de la antena para densidades de potencia.		
				10 mW/cm <sup>2</sup>	1m W/cm <sup>2</sup>	0,1m W/cm <sup>2</sup>
LET	8.1	2.5	30.4	0.246	0.78	2.46
AN/TSC-54	8.1	8	50.8	0.46	1.45	4.58
AN/FSC-9	8.1	20	7.6	6.23	19.7	62.3
Intelsat	6.25	5	0.73	----	----	12.3
Goldstone Venus	2.38	450	97.3	4.16	13.2	41.6
Goldstone Mars	2.38	450	16.8	9.68	33.4	106

TABLA 2

**Características previsibles de radares típicos con potencia máxima elevada<sup>10</sup>**

Sistema	f (GHz)	P <sub>av</sub> (kW)	W <sub>max</sub> (mW/cm <sup>2</sup> )	Distancia desde la antena, en Km, densidades de potencia.		
				10mW/cm <sup>2</sup>	1mW/cm <sup>2</sup>	0,1mW/cm <sup>2</sup>
Radar de adquisición de datos FPN-40	9.0	0.18	12.8	0.028	0.111	0.351
Radar de adquisición de datos ARSR	1.335	20	111	0.147	0.465	1.47
Radar de rastreo Hawk Hi Power	9.8	4.7	800	0.108	0.344	1.38
Radar de rastreo n.1	2.85	12	34.2	0.392	1.24	3.93
Radar de rastreo n.2	1.30	150	55.7	1.75	5.52	17.5

TABLA 3

**Datos experimentales para radares de aviación típicos**

Sistema de radar	Tipo de maquina	F(GHz)	Potencia promedio (W)	Densidad de potencia máxima (mW/cm <sup>2</sup> )	Distancia aproximada del radome, en m, para densidades de potencia de:	
					1mW/cm <sup>2</sup>	10 mW/cm <sup>2</sup>
WP103	BAC111	9.375	26	20	3	11
AVQ20	Convair 580	9.375	16	10	2	11
AVQ50	Convair 580	9.375	16	26	2	11
AVQ20	DC - 9	9.375	28	15	4	13

TABLA 4

**Densidades de potencia en las cercanías de radares de marina (antenas no rotatorias)** <sup>20</sup>

Sistema	F(GHz)	Potencia		Distancia desde la antena	Promedio de densidad de potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	
		Máxima (kW)	Promedio (W)		calculada	Medida
Decca 101	9.445	3	2.25	25.9	6.8	7.5 ± 5.4
Decca 202	9.445	3	1.5	45.7	3.6	5.1 ± 4.6
Decca RM 316	9.41	10	5	103.6	3.7	5.9 ± 5.0
Kelvin – Hughes 17	9.445	3	2.75	103.6	0.6	1.4
Konel KRA 221	9.375	10	4.8	54.7	9.2	6.1 ± 4.5

TABLA 5

**Parámetros de emisoras de radio** <sup>23</sup>

Servicio	Frecuencia (MHz)	Máx. ERP (kW)	Altura de la torre (m)	Intensidad de campo (mV/m)	Densidad de potencia (μW/cm <sup>2</sup> )
				A 1 milla de distancia	
FM radio	88-108	100	152	1023	2.78
VHF-TV, ch 2-6	54-88	100	305	807	1.73
VHF-TV, ch 7-13	174-216	316	305	191	0.1
UHF-TV	470-890	5000	305	380	0.38

TABLA 6

**Conductividad y permitividad relativa de medios biológicos en frecuencias de microondas** <sup>45</sup>

Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (cm)	Medios con gran proporción de agua		ε'	σ (mS/m)
		ε'	σ (S/m)		
10	3000	160	0,625	-	-
100	300	71,7	0,889	7,5	19,1 - 75,9
300	100	54	1,37	5,7	31,6 - 107
915	32,8	51	1,60	5,6	55,6 - 147
2450	12,2	47	2,21	5,5	96,4 - 213
3000	10	46	2,26	5,5	110 - 234
5000	6	44	3,92	5,5	162 - 309
10000	3	39,9	10,3	4,5	324 - 549

TABLA 7

**Profundidad de penetración en función de la frecuencia <sup>44</sup>**

Frecuencia (MHz)		10	100	300	915	2450	3000	5000	10000
Profundidad de Penetración	Tejidos con poca cantidad de agua (hueso, adiposo)	-	60,4	32,1	17,7	11,2	9,7	6,7	3,4
	Tejidos con gran cantidad de agua (músculo, piel)	21,6	6,67	3,9	3,0	1,7	1,6	0,79	0,34

Tabla 8

**Datos biológicos para varias especies y las relaciones a/b y b/c para el modelo elipsoidal**

Especie	Peso medio (kg)	Altura media 2 a (m)	a/b	b/c
Hombre	70,00	1,75	4,478	2,00
Mujer	61,14	1,61	4,02	2,21
Ectomorfo (delgado)	47,18	1,76	5,5	2,00
Mesomorfo	93,26	1,76	4,0	1,91
Endomorfo (obeso)	141,00	1,76	3,92	1,32
Niño (10 años)	32,2	1,38	4,93	1,84
Niño (5 años)	19,5	1,12	4,67	1,73
Mono sentado	3,5	0,4	2,53	1,5
Perro	15,00	1,12	5,92	1,4
Conejo	1,00	0,4	5,52	1,1
Rata	0,2	0,15	2,54	1,37
Ratón	0,02	0,0536	1,73	1,35

TABLA 9

**Comparación de valores medios y calculados de la potencia total absorbida por monos vivos**

Propiedades del modelo elipsoidal	Polarización	Potencia total absorbida		Diferencia relativa %
		Media	Calculada	
A=.14 m	EKH	847 mW	845 mW	0,24
B=.094 m	EKH	832 mW	819 mW	16
C= .063 m	KEH	376 mW	328 mW	13
$\sigma= .092$ S/m	HEK	360 mW	300 mW	17
	KHE	166 mW	138 mW	17
	HKE	162 mW	134 mW	17

Tabla 10

Proyecciones para absorción electromagnética por cuerpo entero en ser humano de altura  $L_m$  en metros <sup>67</sup>

	$\bar{E} \parallel L$ Campo eléctrico a lo largo de longitud mayor		$\bar{K} \parallel L$ Potencia que se propaga desde la cabeza a los pies		$\bar{H} \parallel L$ Campo magnético a lo largo de longitud mayor	
	Potencia que se propaga de brazo a brazo	Potencia que se propaga desde el frente a la espalda	E de brazo a brazo	E de frente a espalda	E de brazo a brazo	E de frente a espalda
Densidad de potencia absorbida promedio (W/kg) en las respectivas frecuencias de resonancia, por campos incidentes de $10 \text{ mW/cm}^2$	$2,18 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$2,15 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,71 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,47 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,43 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,37 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$
Frecuencias de absorción máxima (MHz)	$\approx 67,9 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$\approx 67,9 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$\frac{143-171}{\left( \frac{1,75}{L_m} \right)}$	$\frac{143-171}{\left( \frac{1,75}{L_m} \right)}$	$\frac{143-171}{\left( \frac{1,75}{L_m} \right)}$	$\frac{143-171}{\left( \frac{1,75}{L_m} \right)}$
Promedio del cuerpo entero para $\alpha = (\text{W/kg})/(\text{mW/cm}^2)$	$0,218 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,215 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,071 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,047 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$0,043 \left( \frac{1,75}{L_m} \right)$	$\frac{0,037}{\left( \frac{1,75}{L_m} \right)}$
Condición de absorción máxima	$L \approx 0,4 \lambda$	$L \approx 0,4 \lambda$	$L \approx 1,0- 1,1 \lambda$	$L \approx 1,0- 1,1 \lambda$	$L \approx 1,0- 1,1 \lambda$	$L \approx 1,0- 1,1 \lambda$

TABLA 11

**Potencia total absorbida en comparación con el metabolismo basal (Régimen Metabólico Basal, RMB) para hombre promedio cuando es irradiado por una onda plana, de densidad de potencia (1 mW/cm<sup>2</sup>)**

Condición	Frecuencia MHz	Régimen de absorción específica SAR (W/kg)	SAR/BMR
Espacio libre, resonancia	62 - 68	0,22	0,13
Espacio libre, resonancia con reflector plano	62 - 68	1,01	0,61
Espacio libre, resonancia con reflector angular de 90°	62 - 68	5,82	3,5
A tierra, resonancia	31 - 34	0,43	0,25
A tierra, resonancia con reflector plano	31 - 34	2,03	1,22
A tierra, resonancia con reflector angular de 90°	31 - 34	11,65	7,0

TABLA 12

**Energía de activación de los efectos moleculares en sistemas biológicos<sup>99, 105</sup>**

Fenómeno	Energía de Activación (eV)	Frecuencia correspondiente (GHz)
Ionización	10	$2,4 \times 10^6$
Ruptura de la unión covalente	5	$1,2 \times 10^6$
Cambios conformacionales reversibles en proteínas	0,4	$9,7 \times 10^4$
Ruptura de las uniones hidrógeno	0,08 - 0,2	$1,9 \times 10^4 - 4,8 \times 10$
Movimiento térmico	0,026	$6,3 \times 10^3$
Radiación	$12,3 \times 10^6$	$3 \times 10^{12}$
Rayos X	$12,3 \times 10^3$	$3 \times 10^9$
Luz visible	1,6 - 3,2	$3,8 \times 10^5 - 1,5 \times 10^5$
Microondas	$0,4 \times 10^{-5} - 1,2 \times 10^{-3}$	1 - 300
Ondas de RF	$0,4 \times 10^{-7} - 0,4 \times 10^{-5}$	0,01 - 1

Tabla 13  
**Propiedades de los campos EM en biomateriales**

Tejido con contenido alto de agua					Tejido con contenido bajo de agua					
Frecuencia	Constante dieeléctrica	Conductividad (mho/m)	Tangente de pérdida	Longitud de onda en tejido (cm)	Profundidad de penetración (cm)	Constante dieeléctrica	Conductividad (mho/m)	Tangente de pérdida	Longitud de onda en tejido (cm)	Profundidad de penetración (cm)
1	2000	0.400	3.60	436	9.13	-	-	-	-	-
10	160	0.625	7.03	118	21.6	-	-	-	-	-
27,12	113	0.602	3.54	68.1	14.3	14.6	10.9-43.2	0.51	241	159
40,68	97.3	0.680	3.09	51.3	11.2	7.45	12.6-52.8	0.54	187	118
100	71.7	0.885	2.22	27.0	6.66	5.95	19.1-75.9	0.60	106	60.4
200	56.5	1.00	1.59	16.6	4.79	5.70	25.8-94.2	0.51	59.7	19.2
300	54	1.15	1.28	11.9	3.89	5.60	31.6-107	0.42	41.0	32.1
433	53	1.18	0.92	8.76	3.57	5.60	37.9-118	0.36	28.8	26.2
750	52	1.25	0.58	5.34	3.18	5.60	49.8-138	0.24	16.8	23
915	51	1.28	0.49	4.46	3.04	5.60	55.6-147	0.25	13.7	17.7
1500	49	1.56	0.38	2.81	1.42	5.60	70.8-171	0.19	8.41	13.9
2450	47	2.17	0.34	1.76	1.70	5.50	96.4-213	0.15	5.21	11.2
3000	46.5	2.27	0.29	1.45	1.61	5.50	110-234	0.14	4.25	9.74
5000	44	4.55	0.37	0.890	0.788	5.20	162-309	0.13	2.63	6.67
5800	43.3	4.93	0.35	0.775	0.720	5.10	186-338	0.14	2.29	5.24
8000	40	8.33	0.47	0.578	0.413	4.70	255-431	0.12	1.73	4.61
10000	39.9	10	0.45	0.464	0.343	4.50	324-549	0.13	1.41	3.39

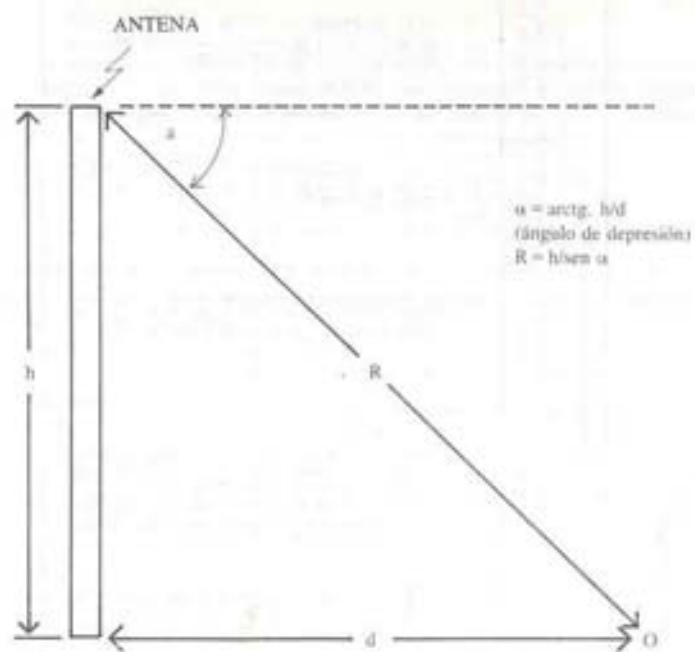


FIGURA 1

Nomenclatura de parámetro en una emisora de radio.

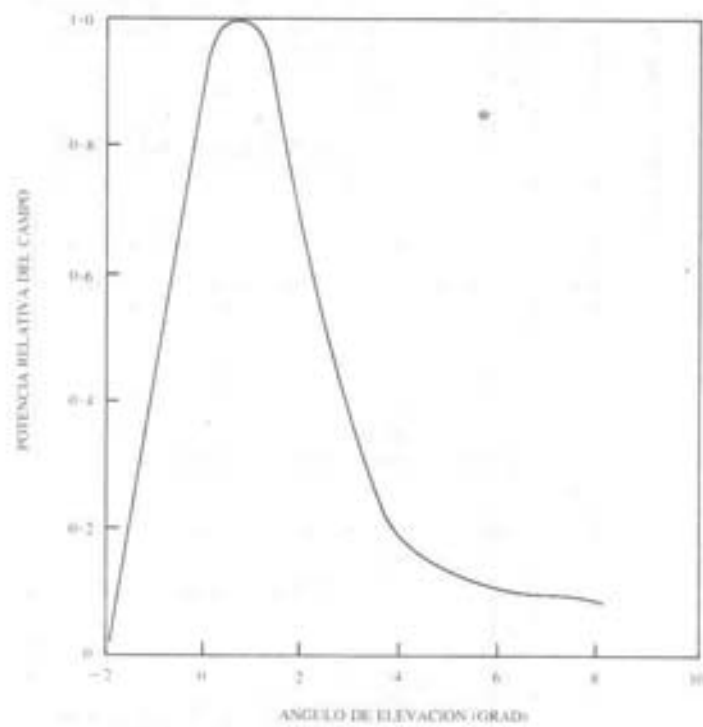


FIGURA 2

Esquema de radiación típico de una emisora de radio.

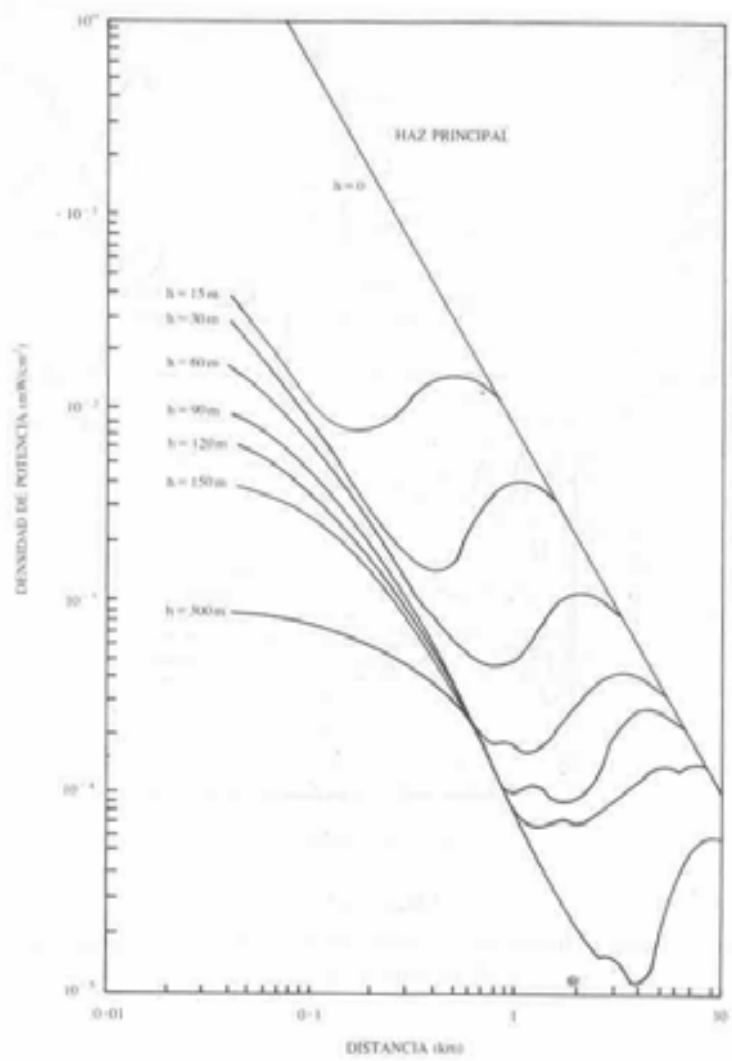


FIGURA 3

Densidad de potencia vs. distancia a varias alturas, para una estación de TV, con ERP = 1 MW.

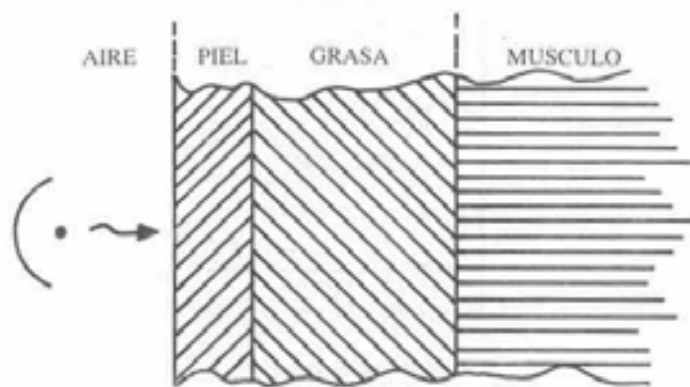


FIGURA 4

Modelo plano de tres capas para cuerpo humano o animal.

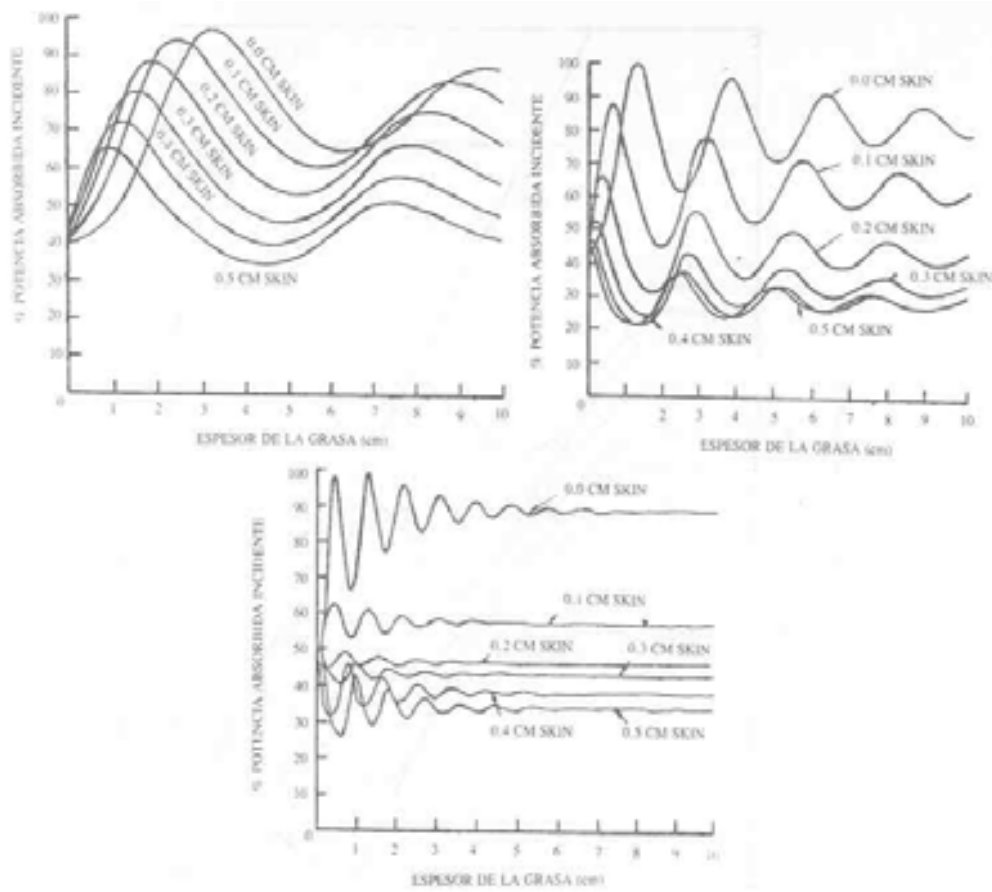


FIGURA 5

Densidad de potencia máxima absorbida en capas planas de piel y músculos en función del espesor de la capa de grasa<sup>44</sup>.

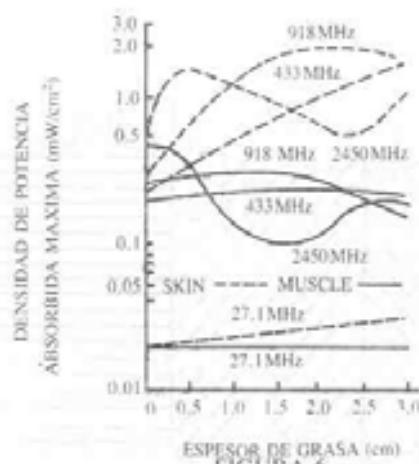


FIGURA 6

Potencia absorbida vs. espesor de las capas de piel y grasa en tres frecuencias.

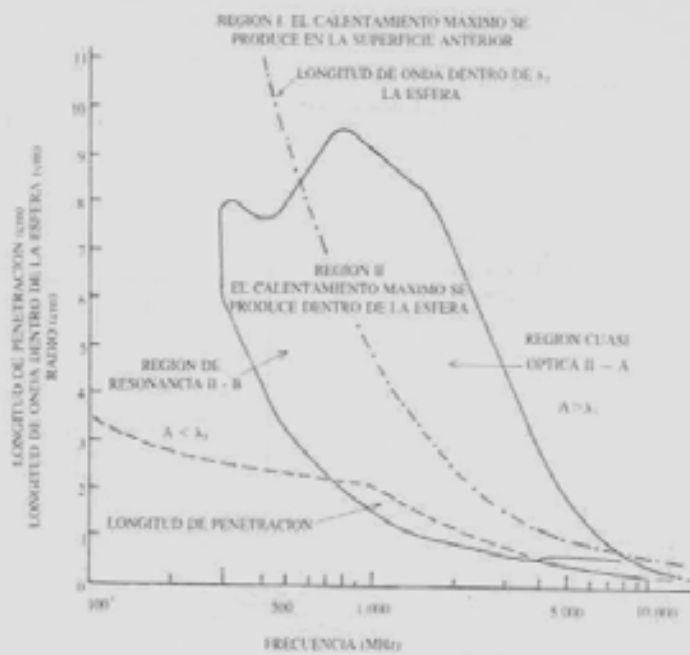


FIGURA 7

Regiones de calentamiento máximo para una esfera homogénea que posee propiedades dieléctricas de cerebros humanos<sup>48</sup>.

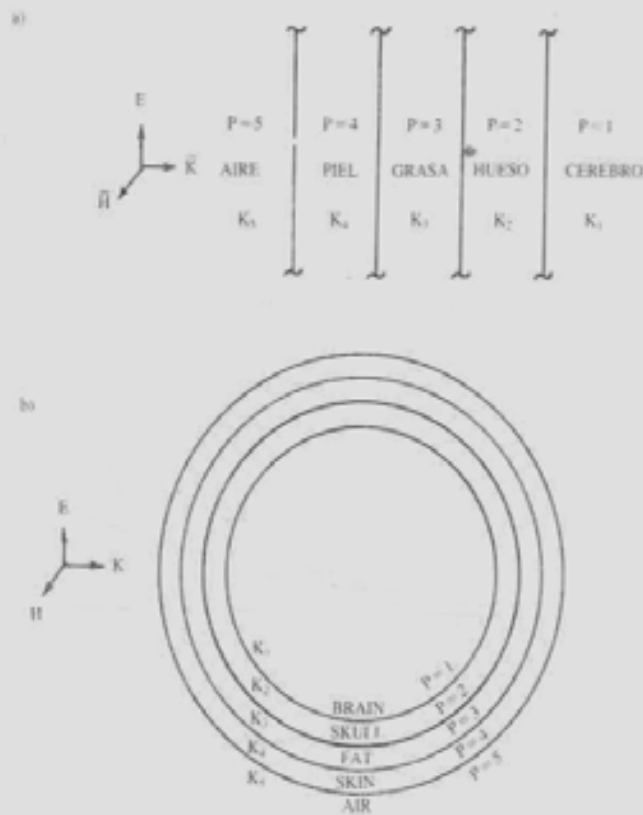


FIGURA 8

Modelo multicapas de la cabeza. a) Plano; b) Esférico.

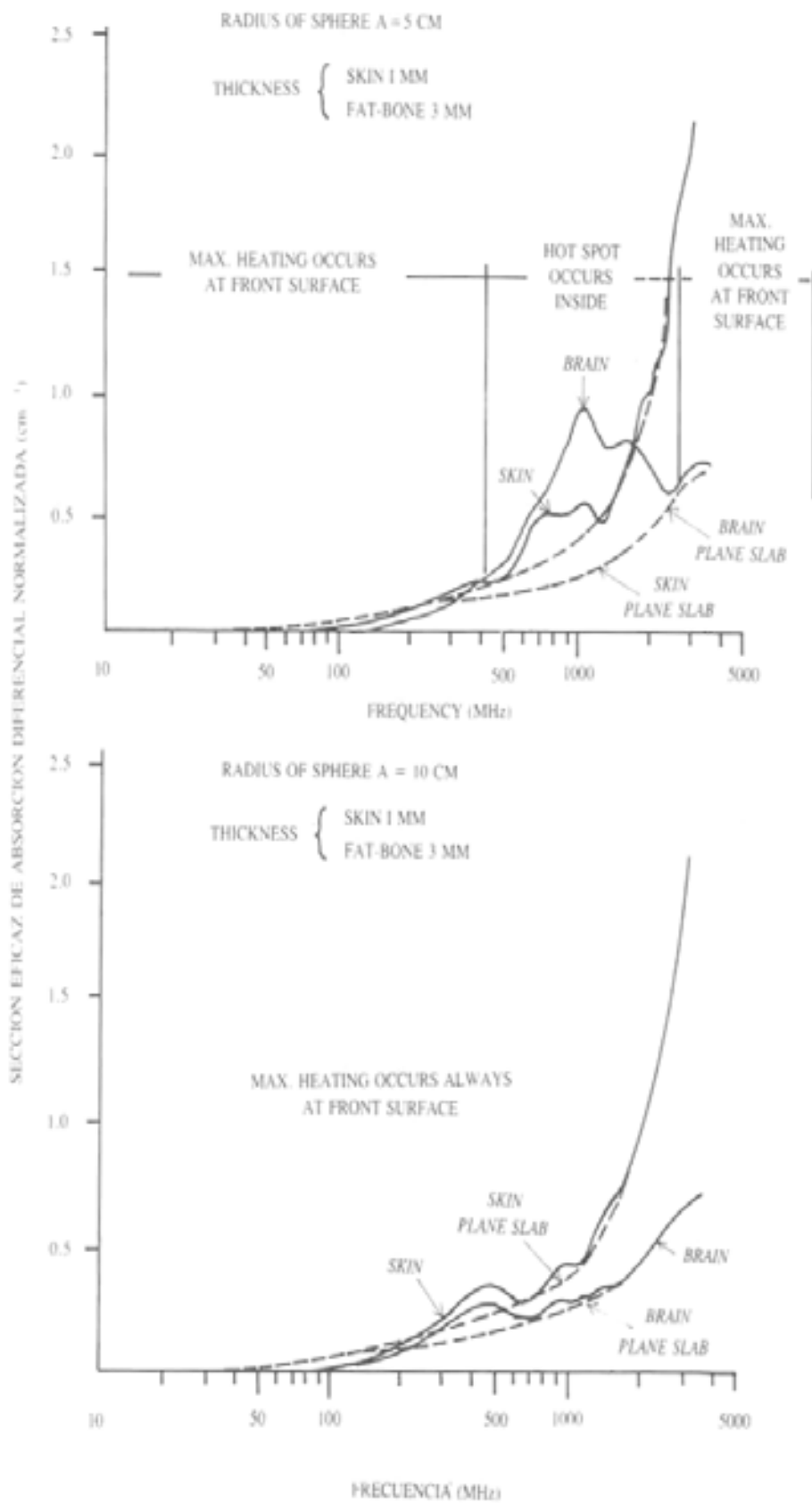


FIGURA 9

Sección eficaz de absorción diferencial normalizada para varios modelos<sup>52</sup>.

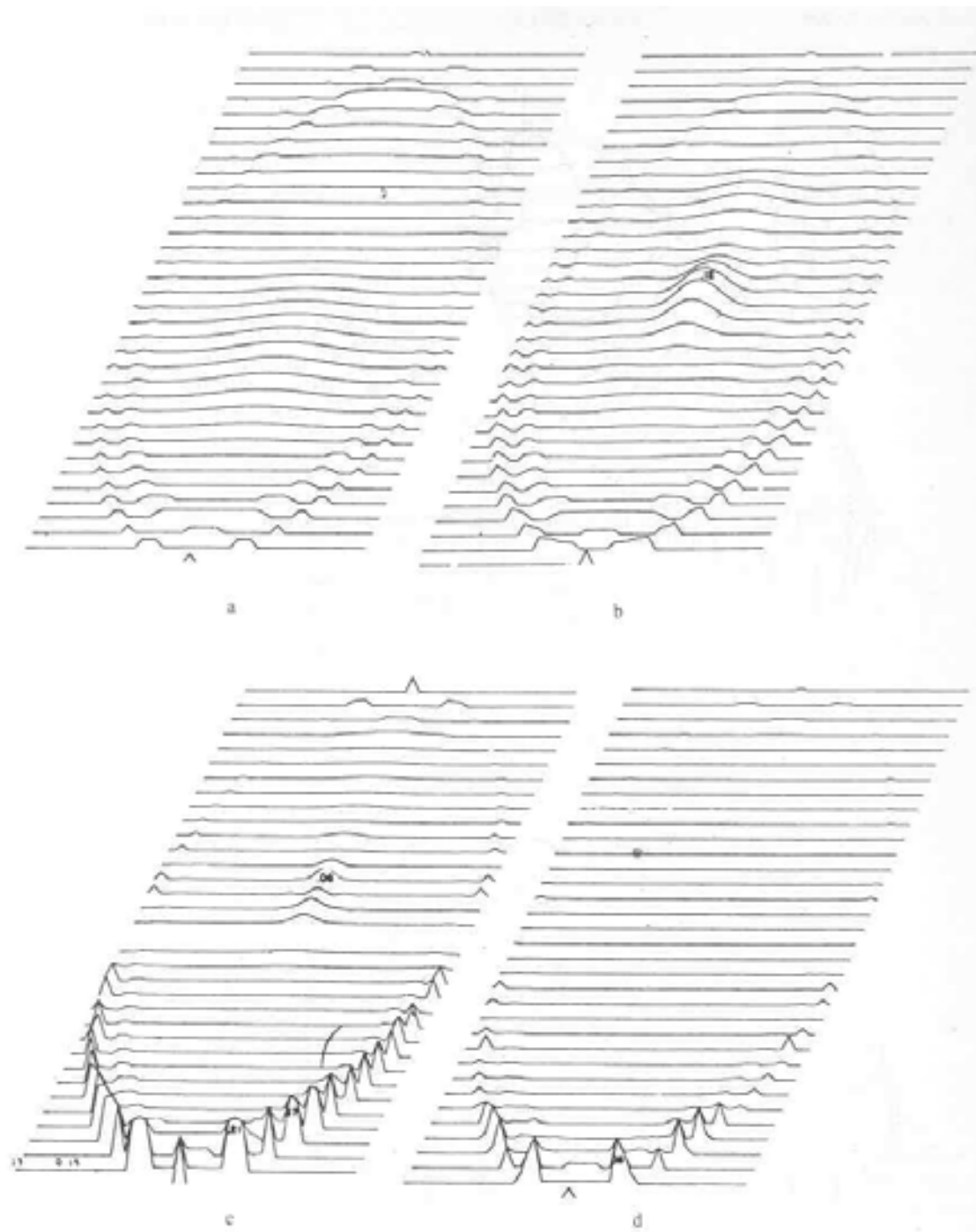


FIGURA 10

Densidad de potencia absorbida normalizada en una cabeza de 6,6 cm de radio;  
 a) 433 MHz, b) 915 MHz, c) 2,45 GHz, d) 5,8GHz<sup>54</sup>.

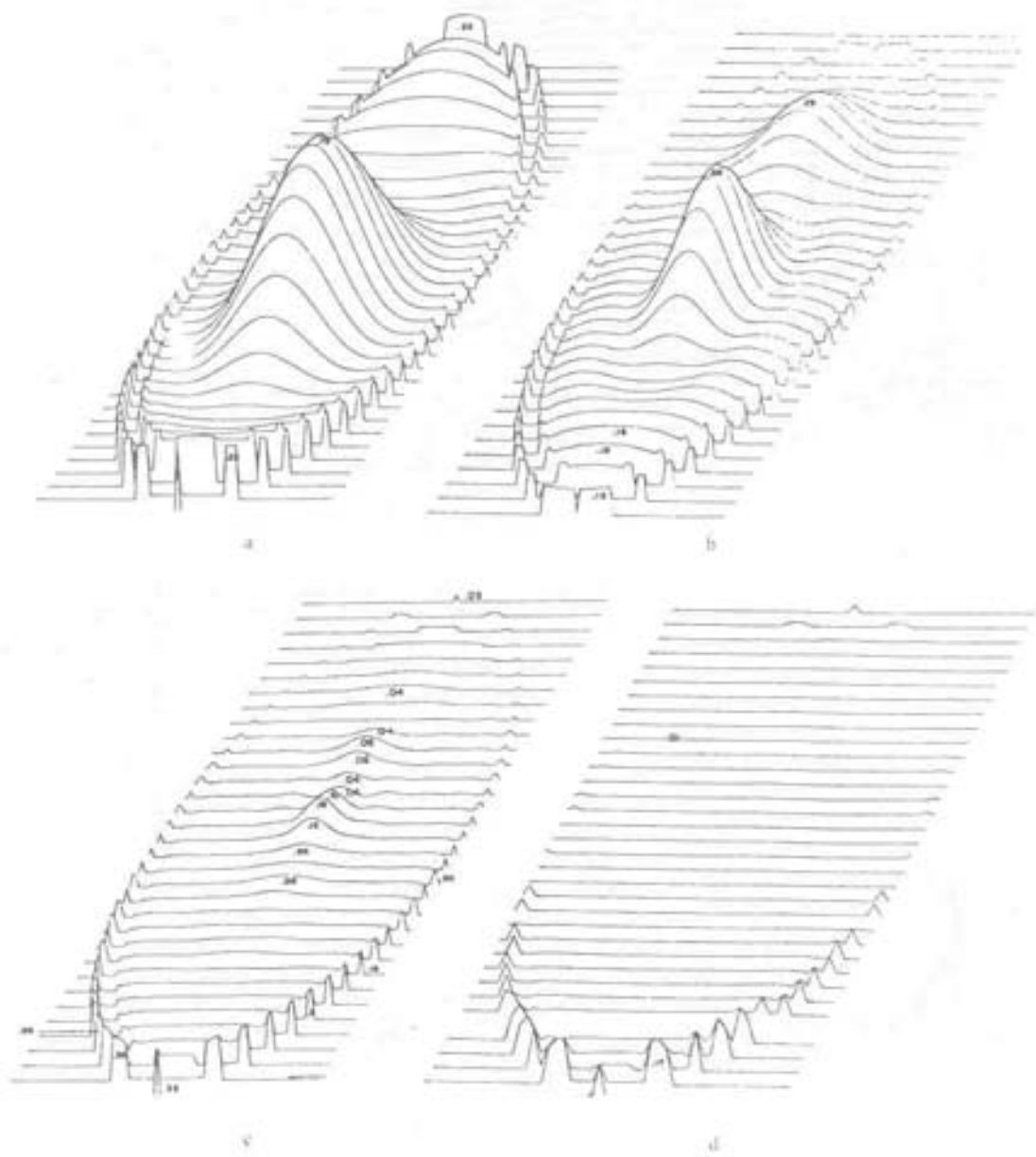


FIGURA 11

Densidad de potencia absorbida normalizada en una cabeza, en una frecuencia de 3 GHz;  
 a)  $r = 1,1$  cm,  $r_b = 0,89$  cm, b)  $r = 1,65$  cm,  $r_b = 1,34$  cm, c)  $r = 3,3$  cm,  $r_b = 2,68$  cm, d)  $r = 6,6$  cm,  
 $r_b = 5,4$  cm.  $r$  simboliza el radio de la cabeza,  $r_b$  simboliza el radio de la parte central del cerebro<sup>24</sup>.

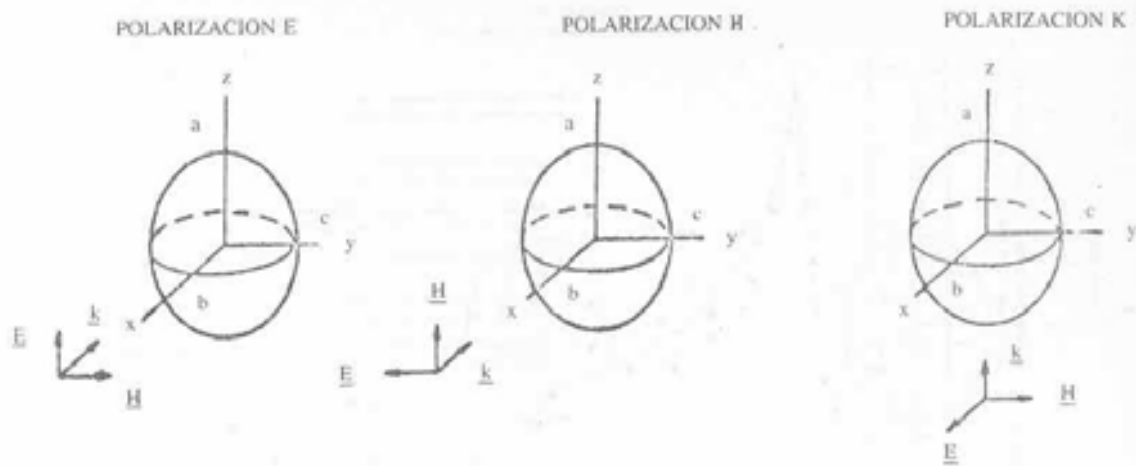


FIGURA 12

Configuraciones de los campos electromagnéticos y del modelo esferoidal prolato.

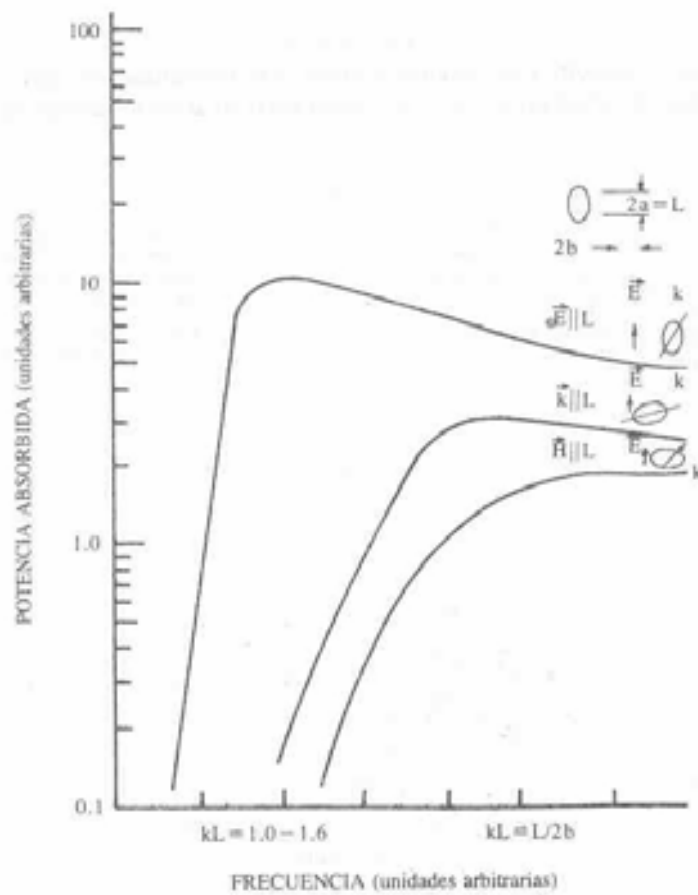


FIGURA 13

Curvas típicas de absorción de ondas electromagnéticas para cuerpos con forma de esferoide prolato.

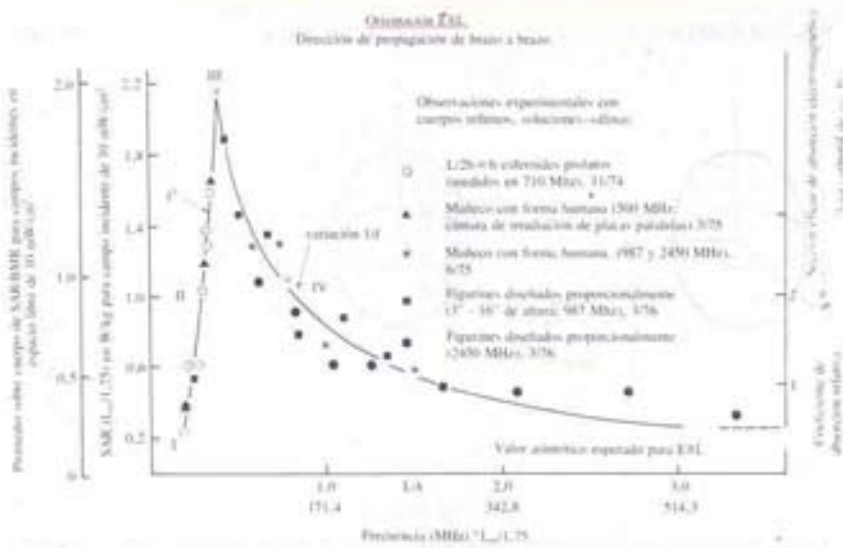


FIGURA 14

Régimen de absorción específica vs. longitud del esferoide, normalizada respecto de la longitud de onda de la radiación; el eje esferoidal longitudinal paralelo al vector campo eléctrico ( $\vec{E}||\vec{L}$ ).

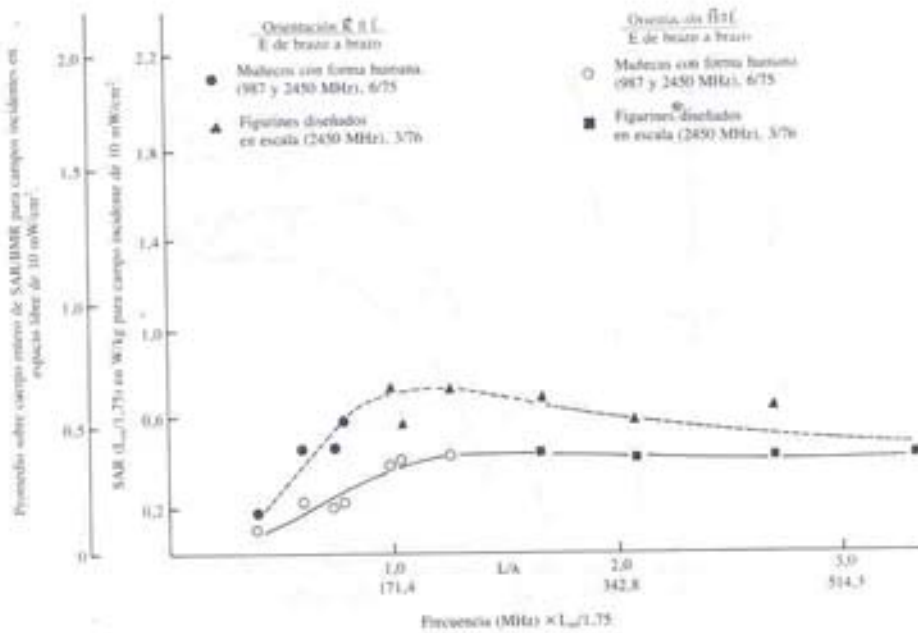


FIGURA 15

Régimen de absorción específica vs. longitud del esferoide, normalizada respecto de la longitud de onda de la radiación; el eje esferoidal longitudinal paralelo al vector campo magnético y a la dirección de propagación de la onda.

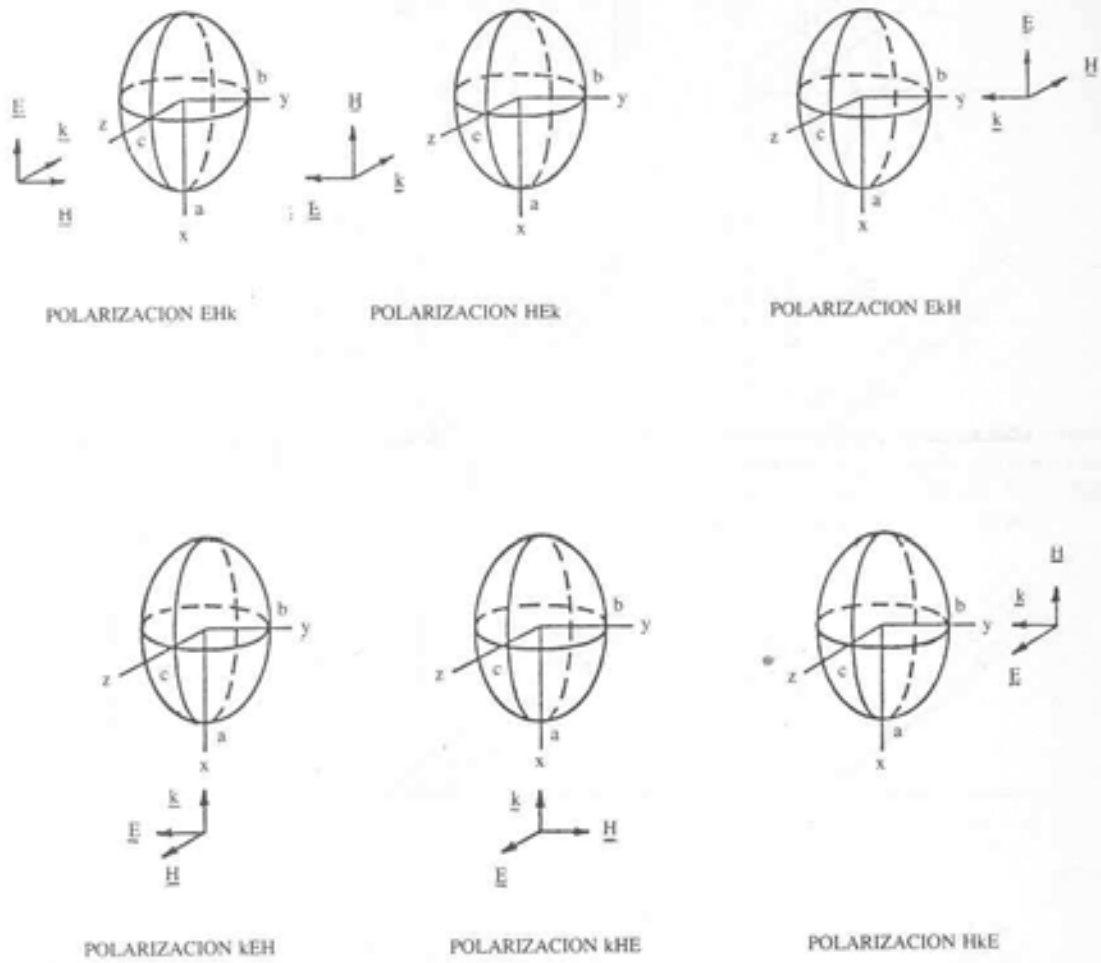
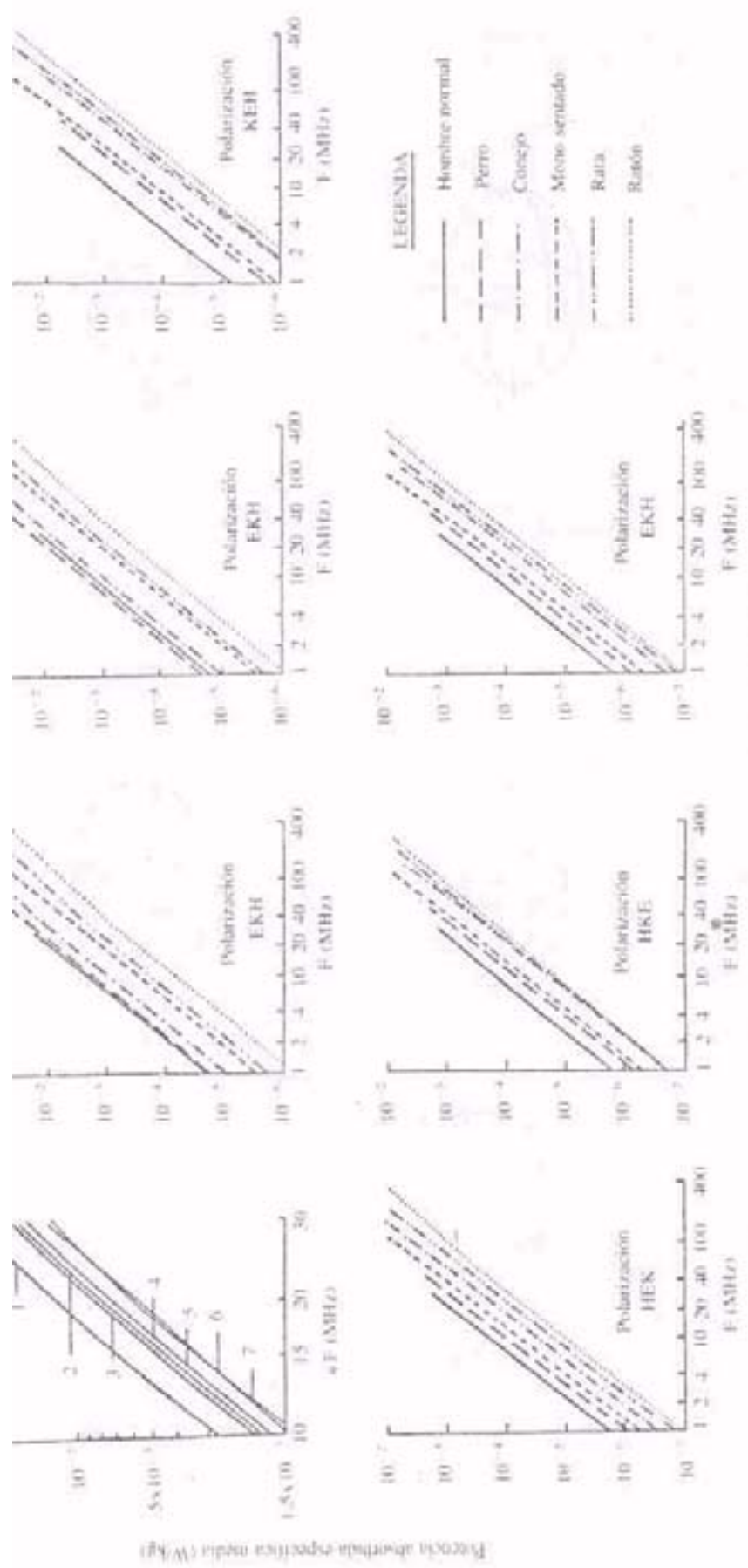


FIGURA 16  
Nomenclatura de la polarización para un elipsoide irradiado por onda plana.



- 5. 10 años de edad
- 6. Endométrico (perceña gruesa)
- 7. Niño de 5 años

- 1. Ectomórfico (perceña delgada)
- 2. Mujer normal
- 3. Hombre normal
- 4. Mesomórfico

FIGURA 17.  
Potencia absorbida específica media en modelos elipsoidales del hombre y de animales de experimentación: densidad de potencia incidente de 1 mW/cm<sup>2</sup>.

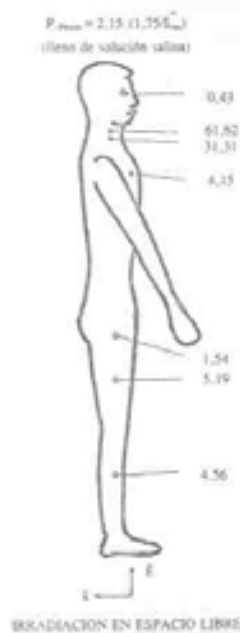


FIGURA 18

Resultados experimentales de la potencia disipada en un fantoma humano irradiado con onda plana de densidad de potencia  $10 \text{ mW/cm}^2$ <sup>67</sup>. (a)  $E||L$ , condición de resonancia  $L/\lambda = 0.4$ .

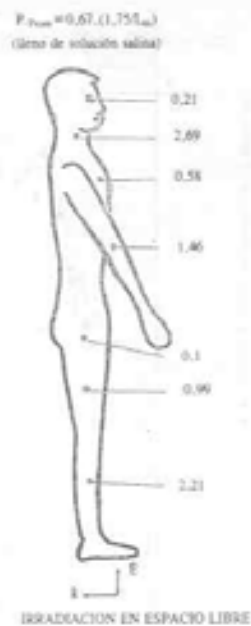


FIGURA 19

Resultados experimentales de la potencia disipada en un fantoma humano irradiado con onda plana de densidad de potencia  $10 \text{ mW/cm}^2$ <sup>66</sup>. (b)  $E||L$ , por sobre resonancia  $L/\lambda = 0.985$ .

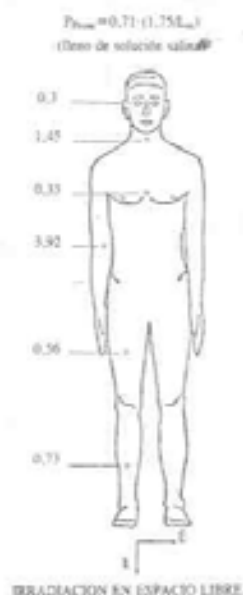


FIGURA 20

Resultados experimentales de la potencia disipada en un fantoma humano irradiado con onda plana de densidad de potencia  $10 \text{ mW/cm}^2$ <sup>66</sup>. (c)  $R||L$ , condición de resonancia  $L/\lambda = 1$ .

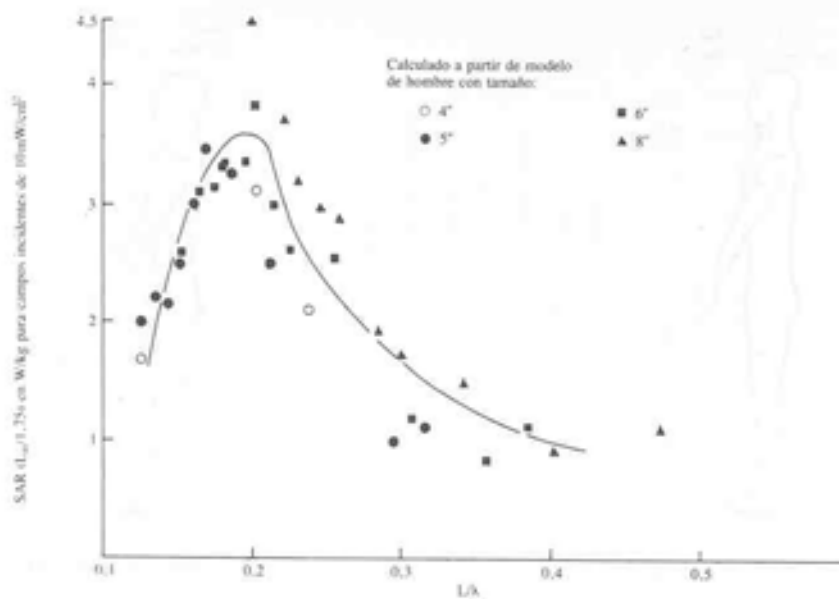


FIGURA 21  
Régimen de absorción específica (SAR) en un modelo esferoidal prolato de hombre en contacto con tierra<sup>68</sup>.

Hombre de 70kg (1,75m de estatura)	Rata de 100g (11,5cm de largo)	Rata de 400g (18,9cm de largo)	Hombre de 70kg (1,75m de estatura)	Rata de 100g (11,5cm de largo)	Rata de 400g (18,9cm de largo)
I. Con resonancia en el espacio libre.			IV. Con resonancia en ubicación en un reflector angular de 90°.		
151 W 2,16 W/kg f = 62-68 MHz	0,8 W 8 W/kg f = 987 MHz	2 W 5 W/kg f = 600 MHz	$27 \times 151 = 4077$ W 58,24 W/kg f = 62-68 MHz	21,6 W 216 W/kg f = 987 MHz	54 W 135 W/kg f = 600 MHz
II. Con resonancia en condiciones de contacto eléctrico con el plano de tierra.			V. Con resonancia en contacto eléctrico con el plano de tierra, frente a un reflector plano.		
$2 \times 151 = 302$ W 4,31 W/kg f = 31-34 MHz			$2 \times 710 = 1420$ W 20,28 W/kg f = 31-34 MHz	$d = 0,125 \lambda$	
III. Con resonancia en ubicación frente a un reflector plano.			VI. Con resonancia en contacto eléctrico con el plano de tierra, en un reflector angular de 90°.		
$4,7 \times 151 = 710$ W 10,14 W/kg f = 62-68 MHz	3,8 W 38 W/kg f = 787 MHz	9,4 W 23,5 W/kg f = 600 MHz	$2 \times 4077 = 8154$ W 116,48 W/kg f = 31-34 MHz	$d = 1,25 \lambda$	

FIGURA 22

Régimenes de absorción específica en el hombre y en ratas de dos tamaños, sometidos a exposición de RF, ondas planas con una densidad de potencia de 10 mW/cm<sup>2</sup>, en diversas condiciones<sup>68</sup>.

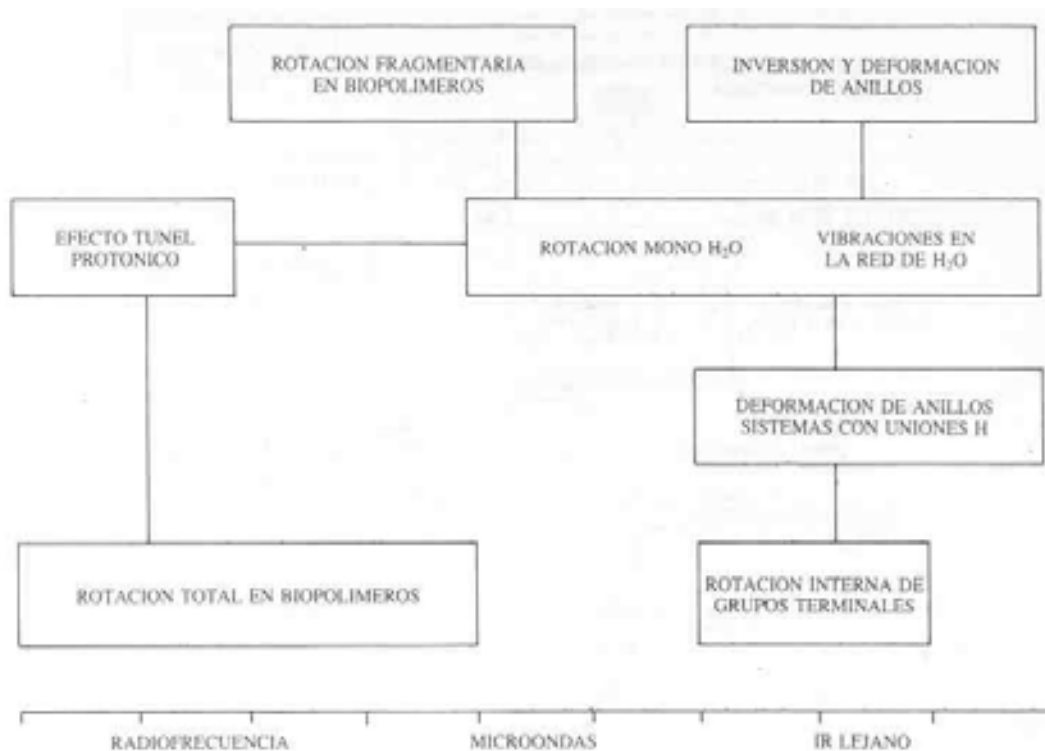


FIGURA 23  
Interacciones esperadas entre radiaciones no-ionizantes y biopolímeros<sup>106</sup>.

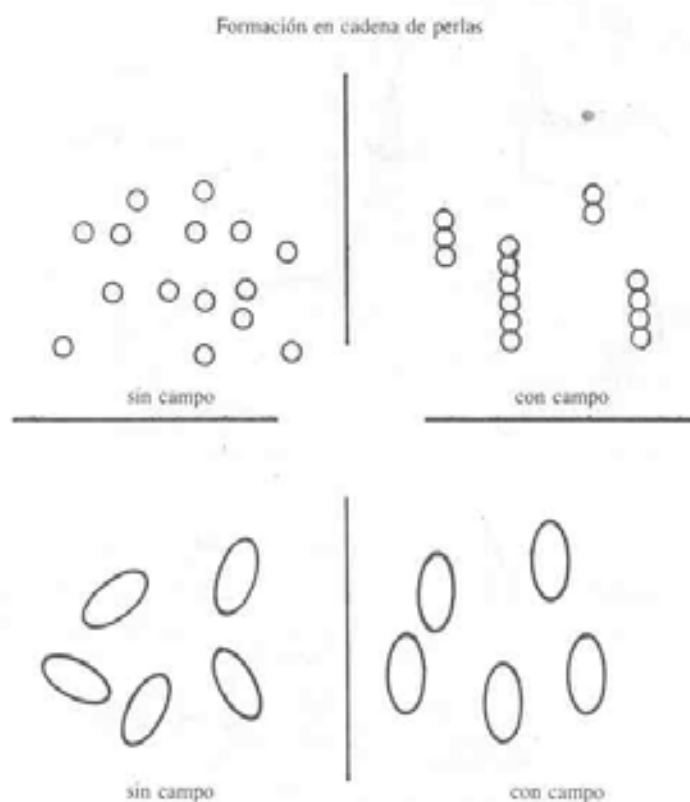
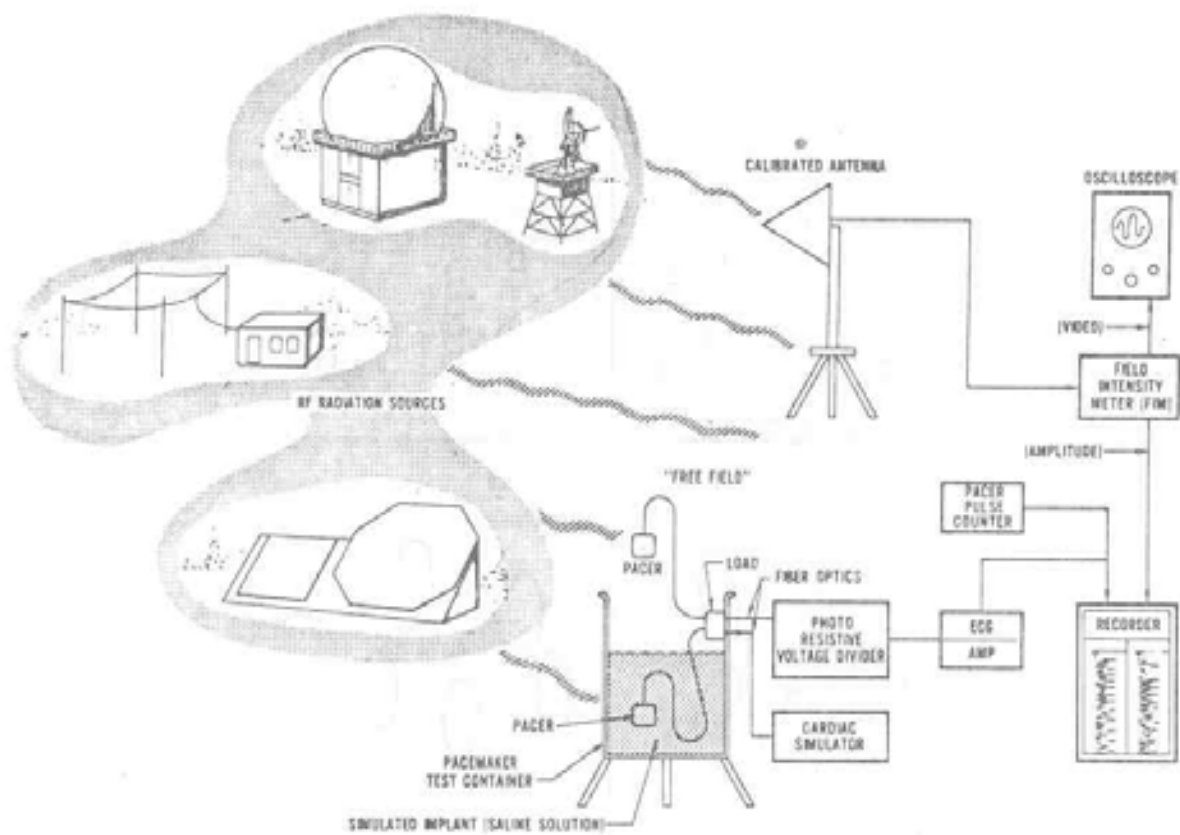
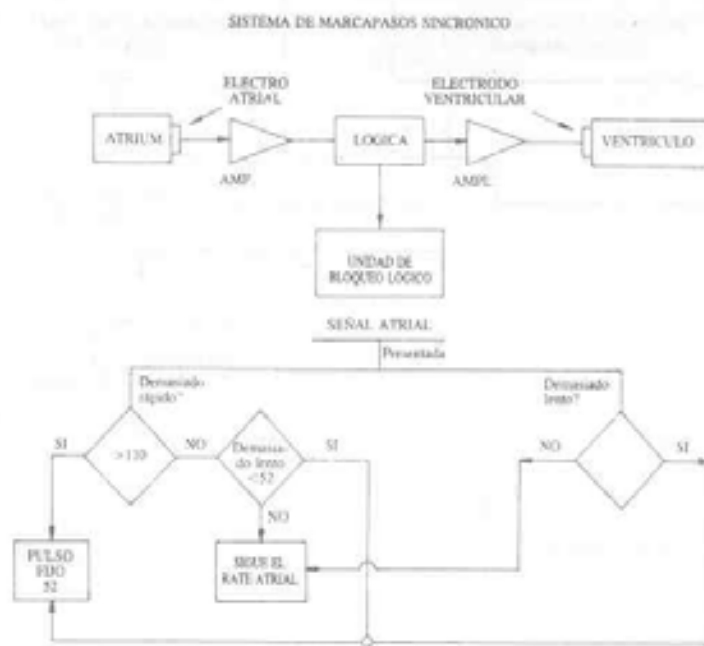


FIGURA 24  
Efectos causados por fuerzas inducidas por el campo.



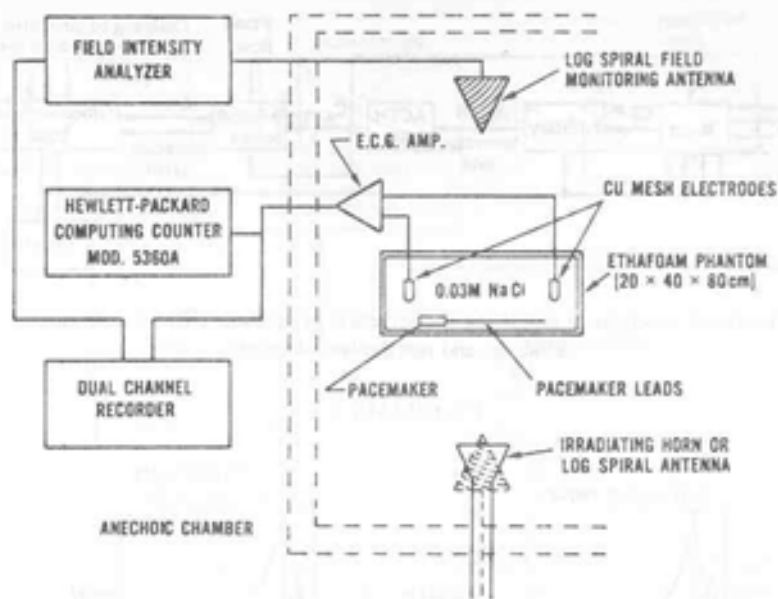
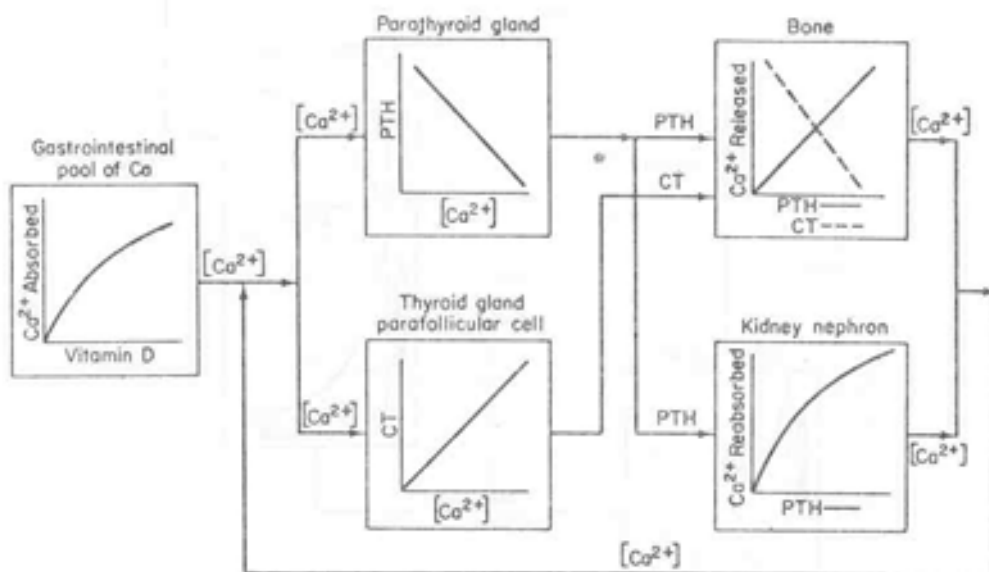
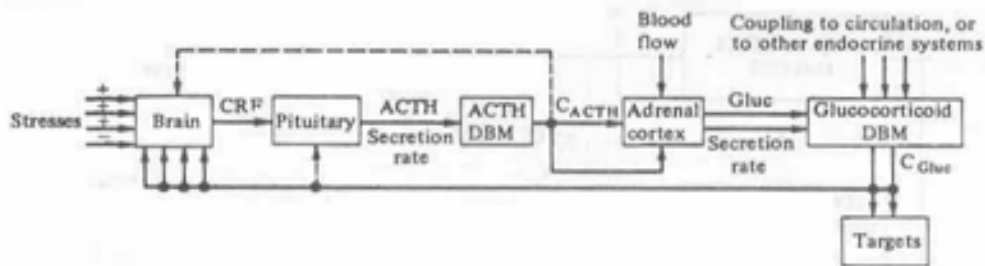


FIGURA 27



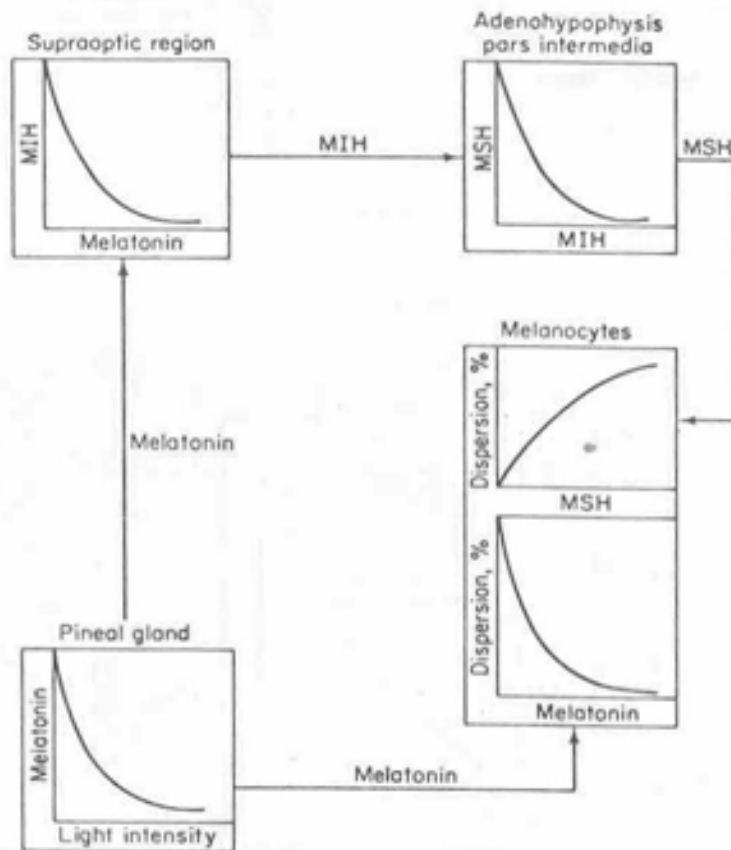
Control of  $[\text{Ca}^{2+}]$  homeostasis by the negative feedback of the  $[\text{Ca}^{2+}]$  on the parathyroid gland, causing the secretion of parathyroid hormone (PTH), and on the parafollicular cell, regulating the secretion of calcitonin (CT).

DIAGRAMA 1



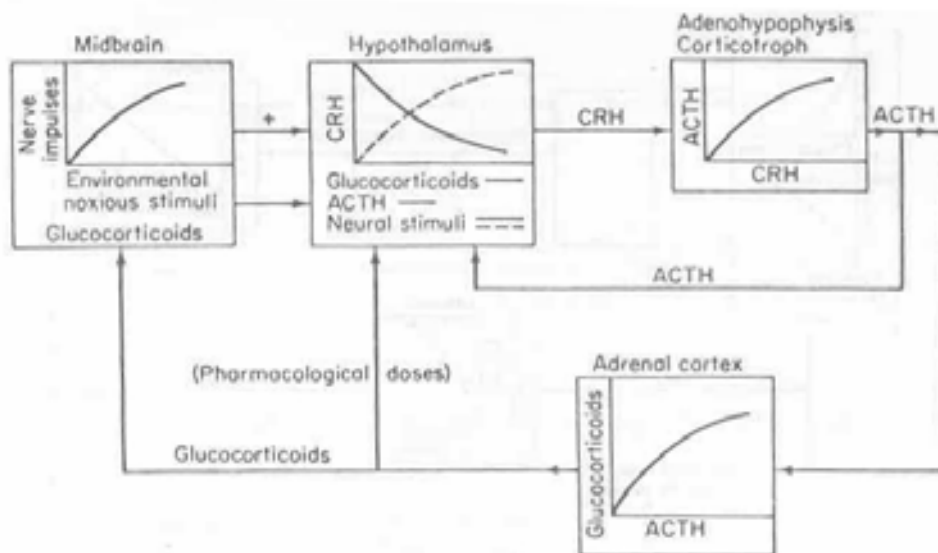
Feedback mechanism regulating the secretion of cortisol. DBM = distribution, binding, and metabolism elements.

DIAGRAMA 2



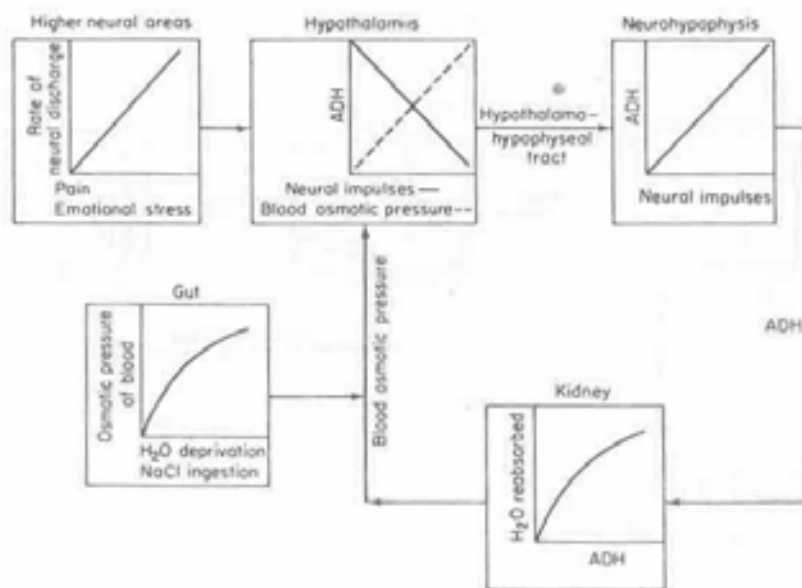
Control of melanocyte-stimulating hormone (MSH) secretion. No feedback from the periphery is seen. Concentration of pigment by melanocyte cells is also possible by the direct action of catecholamines on these cells. MSH-release-inhibiting hormone (MIH) is the major regulator of MSH secretion. The pineal gland probably plays an important role in melanocyte function in amphibians; in higher vertebrates, the pineal gland exerts control on the secretion of gonadotrophin.

DIAGRAMA 3



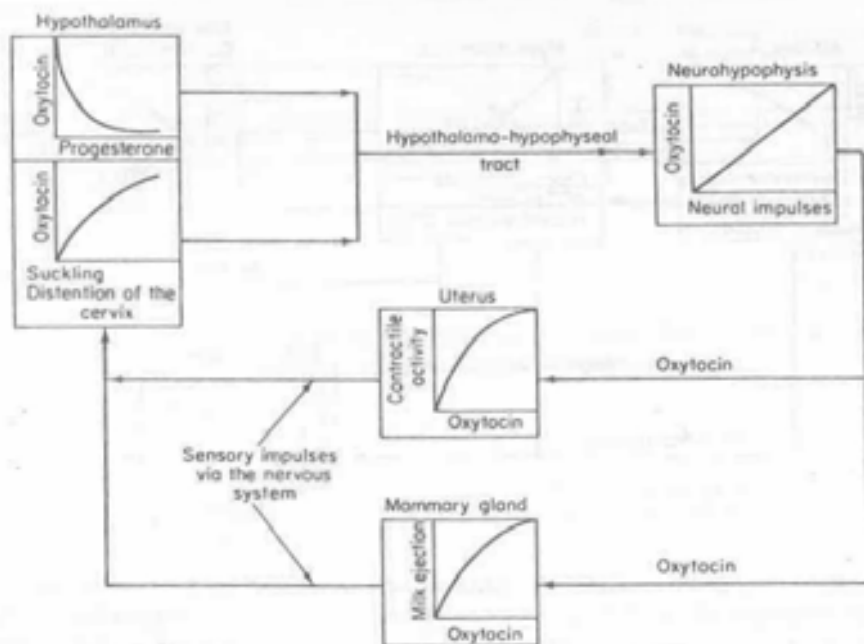
The regulation of adenyhypophyseal secretion of adrenocorticotrophin by neural and hormonal stimuli. Particular note should be made of the dual neural control of the hypothalamus. The short negative-feedback loop between the adenyhypophysis and hypothalamus is a novel control not often seen, but one which contributes an additional level of regulatory sensitivity, + or - indicates simulation or inhibition, respectively.

DIAGRAMA 4



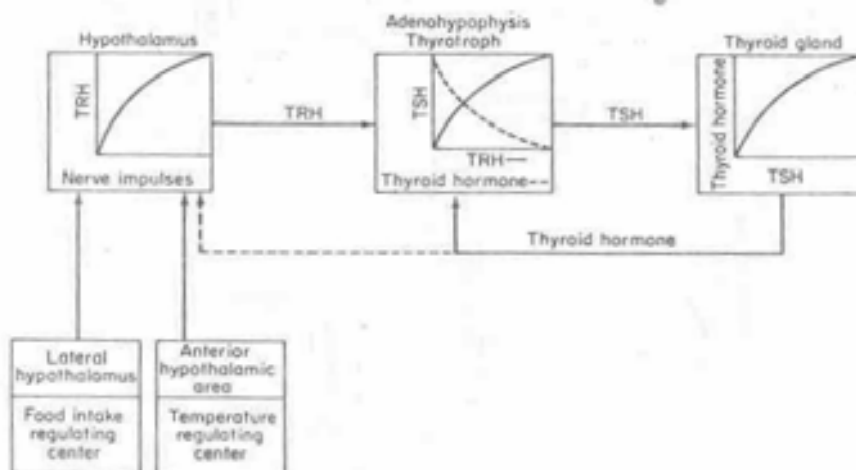
Control of water reabsorption by vasopressin acting as the antidiuretic hormone (ADH). Although plasma osmolality is probably the primary regulator, other factors may contribute to the regulation of the excretion of water.

DIAGRAMA 5



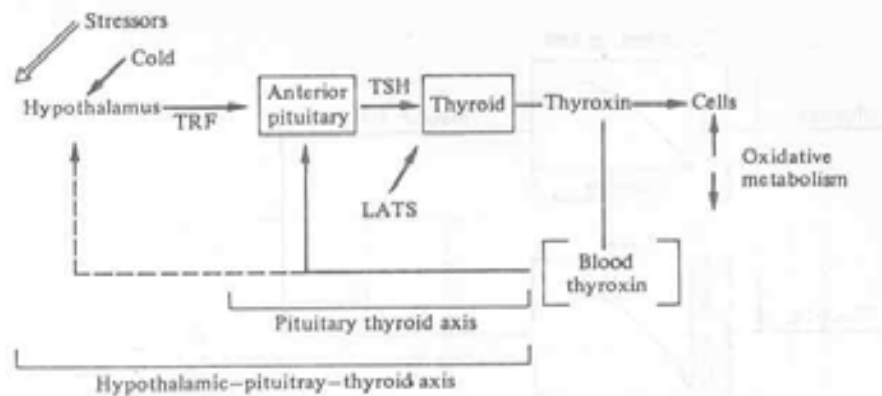
Control of oxytocin secretion in the pregnant and lactating animal. In some mammals, the decline in the secretion of progesterone with aging of the placenta causes a secretion of oxytocin, which induces parturition. Once initiated, the process becomes a positive-feedback system, since distention of the cervix induces further secretion of oxytocin. The relationship of suckling to oxytocin is that of a positive-feedback system.

DIAGRAMA 6

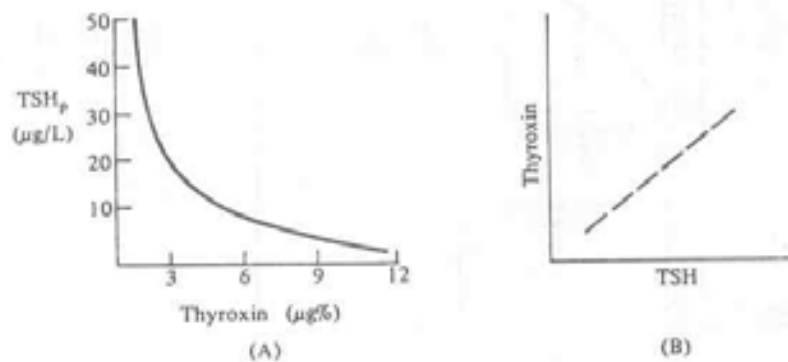


The regulation of thyroid-stimulating hormone (TSH) secretion occurs on two levels; one involves the direct interaction of thyroid hormones with the adenohypophysis and the second involves the hypothalamic control which is modulated by environmental and core temperatures, by food intake, and perhaps by the action of thyroid hormones on the hypothalamus. (TRH, thyroid-stimulating-hormone-releasing hormone.)

DIAGRAMA 7

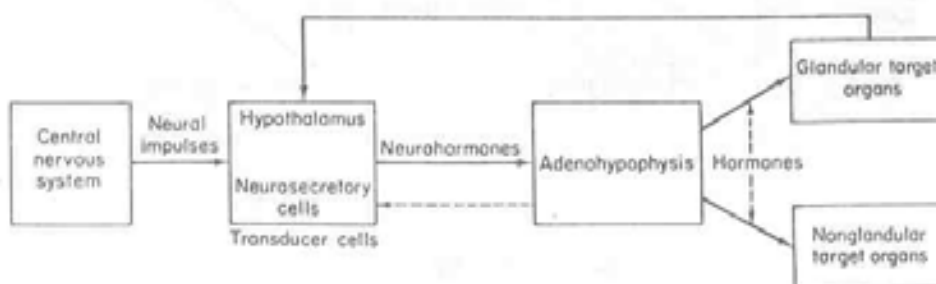


Feedback mechanism regulating the secretion of thyroid hormone. (LATS) long-acting thyroid-stimulating hormone.



A: Power of negative feedback system for thyroxin; B: hypothetical linear effect on thyroxin level of raising the blood TSH.

DIAGRAMA 8



The neurosecretory regulation of hormone secretion. The relationship between the periphery and the central nervous system is schematized to emphasize that these operate under feedback control regulation. Short loops may exist between the adenohypophysis and the hypothalamus, imposing additional regulation.

DIAGRAMA 9

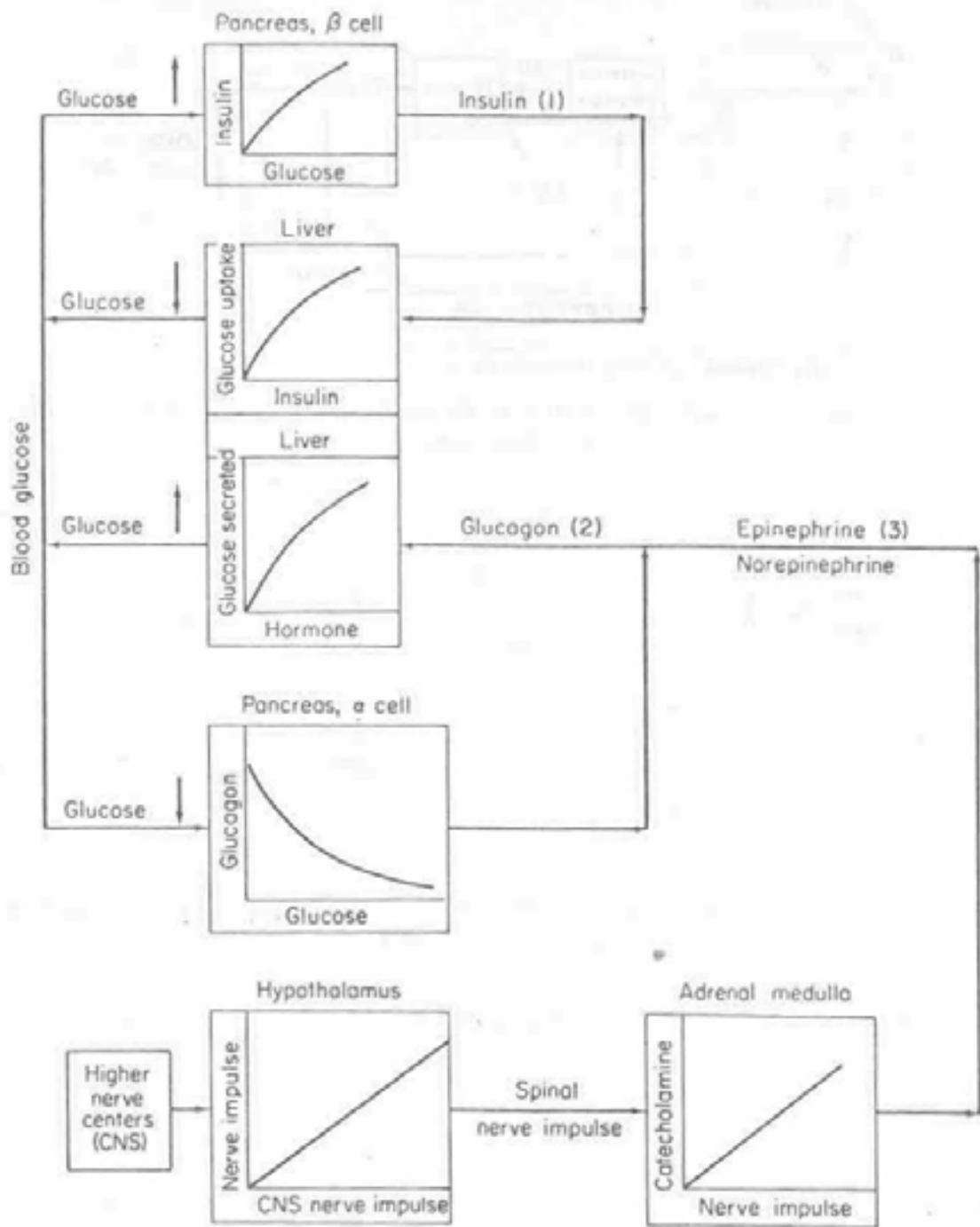
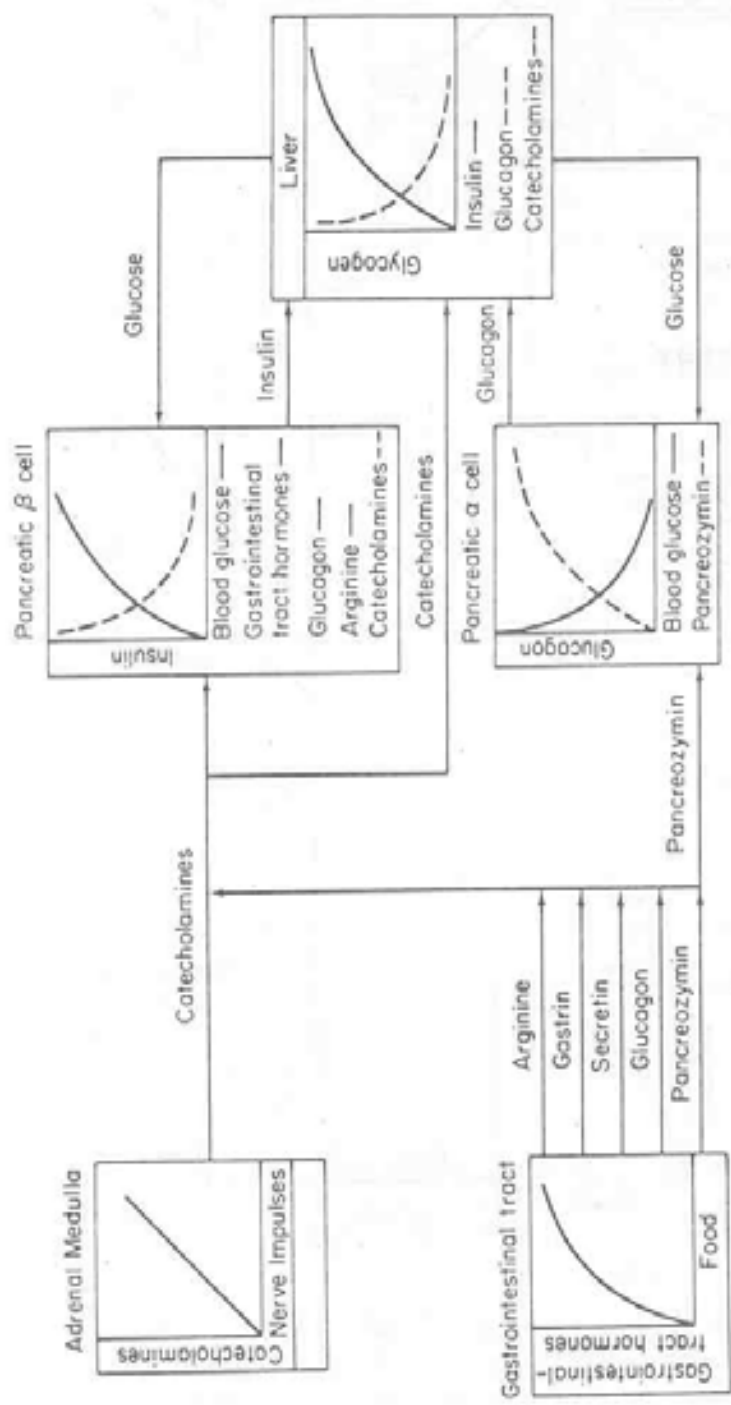
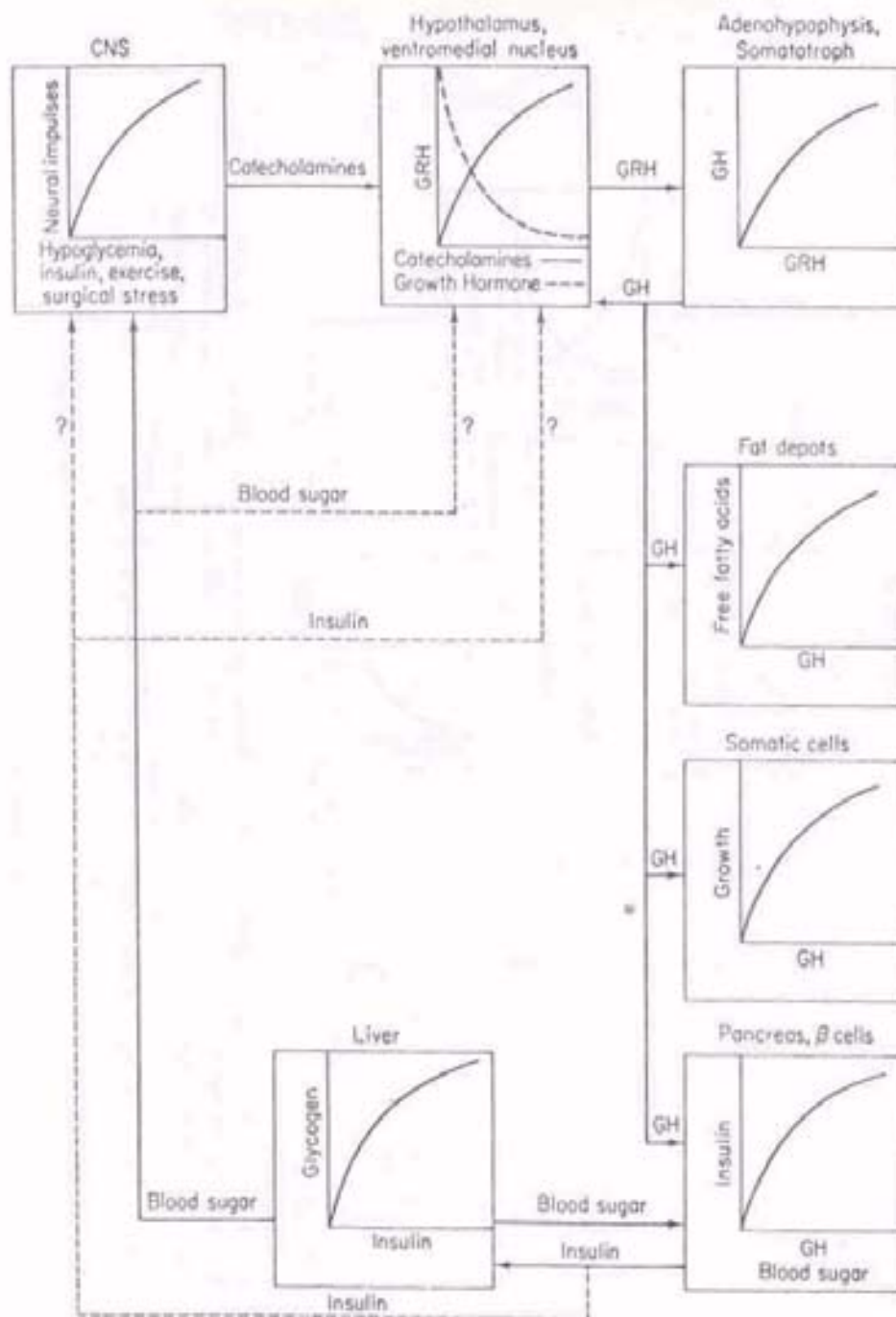


DIAGRAMA 10



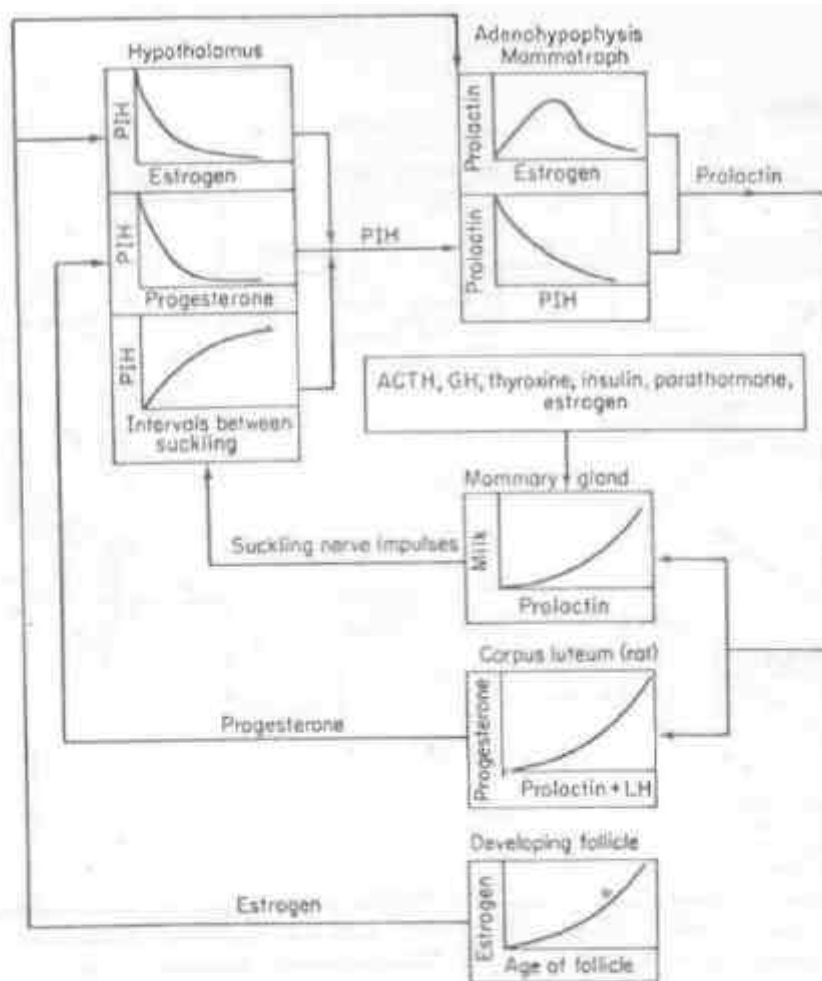
The regulation of blood sugar is mediated principally by insulin and glucagon in the liver. The action of insulin in muscle and adipose tissue as well as in other tissue is omitted. The liver is the only source of glucose in response to the action of glucagon and potentially almost all tissues, including liver, serve as sinks in response to the action of insulin. The catecholamines inhibit  $\beta$ -cell secretion of insulin but stimulate increased release of glucose by the liver. The increase in the concentrations of circulating gastrointestinal-tract hormones provide additional control on the regulation of  $\beta$ -cell secretion.

DIAGRAMA 11



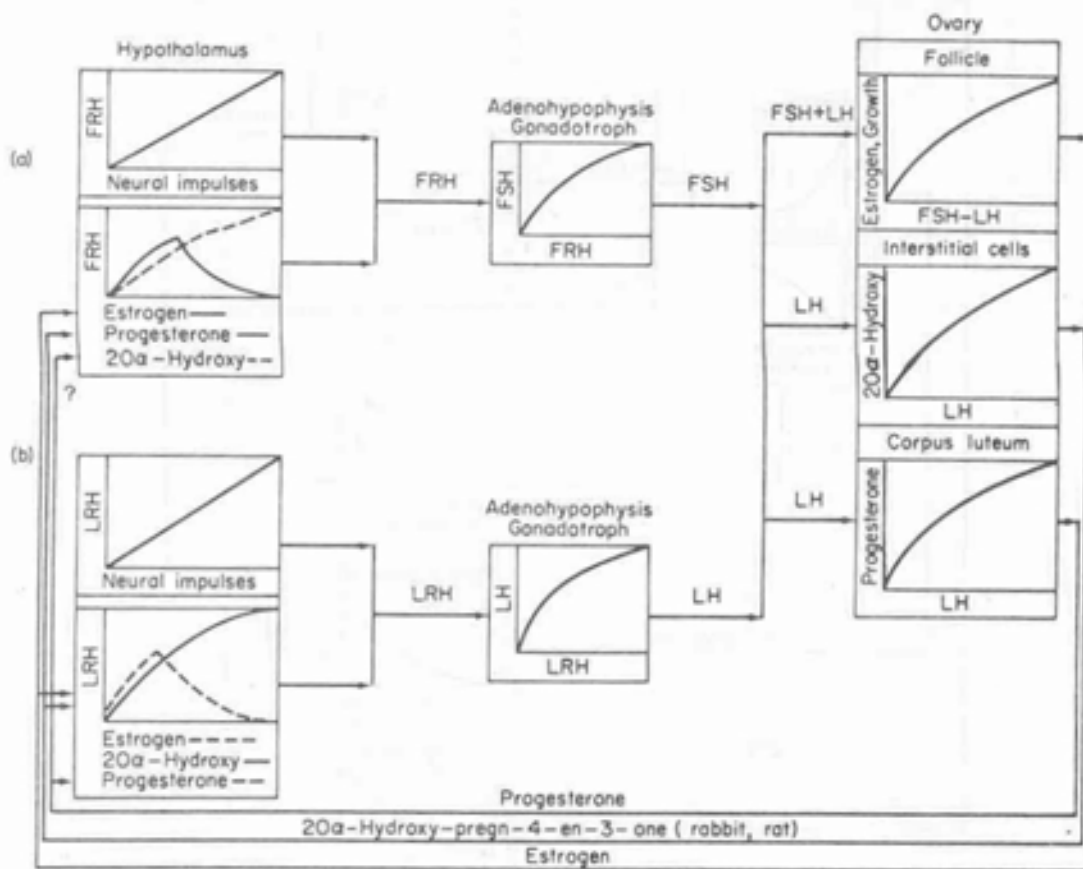
Control of GH secretion. Insulin and growth hormone are present in inverse concentrations in the plasma, and each can indirectly induce secretion of the other; this relationship may result in a positive-feedback control. The negative feedback may be due to the resulting concentration of plasma glucose. A further control may be a short negative-feedback loop created by GH inhibition of hypothalamic secretion of GRH. It is postulated that the control of secretion of GRH from the ventromedial nucleus is by release of catecholamines (norepinephrine and epinephrine L-dopamine), since drugs that inhibit  $\alpha$  receptors or deplete cws catecholamine reserves reduce the response to hypoglycemia and insulin.

DIAGRAMA 12



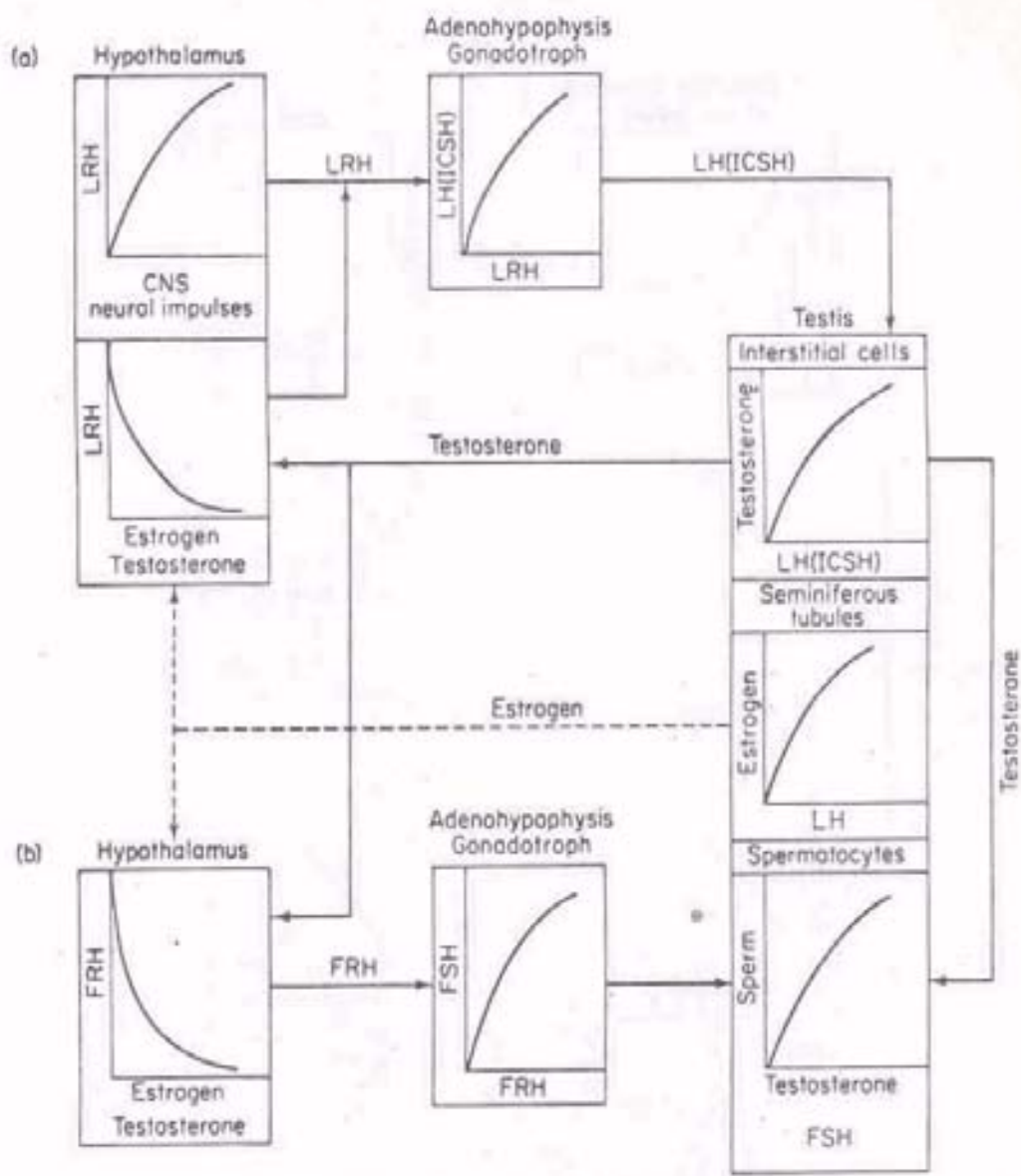
The regulation of the secretion of prolactin (mammotrophin or luteotrophin). The problem of integrating control of lactation is compounded by the concurrent requirements for many other hormones. The secretion of prolactin is controlled by ovarian hormones that act on the hypothalamus and adenohypophysis, and by neural stimuli from the mammary gland. Prolactin entering into the median eminence blocks prolactin formation in the adenohypophysis by increasing PIH formation, which induces atrophy of mammary glands and cessation of lactation: estrogen depresses PIH formation.

DIAGRAMA 13



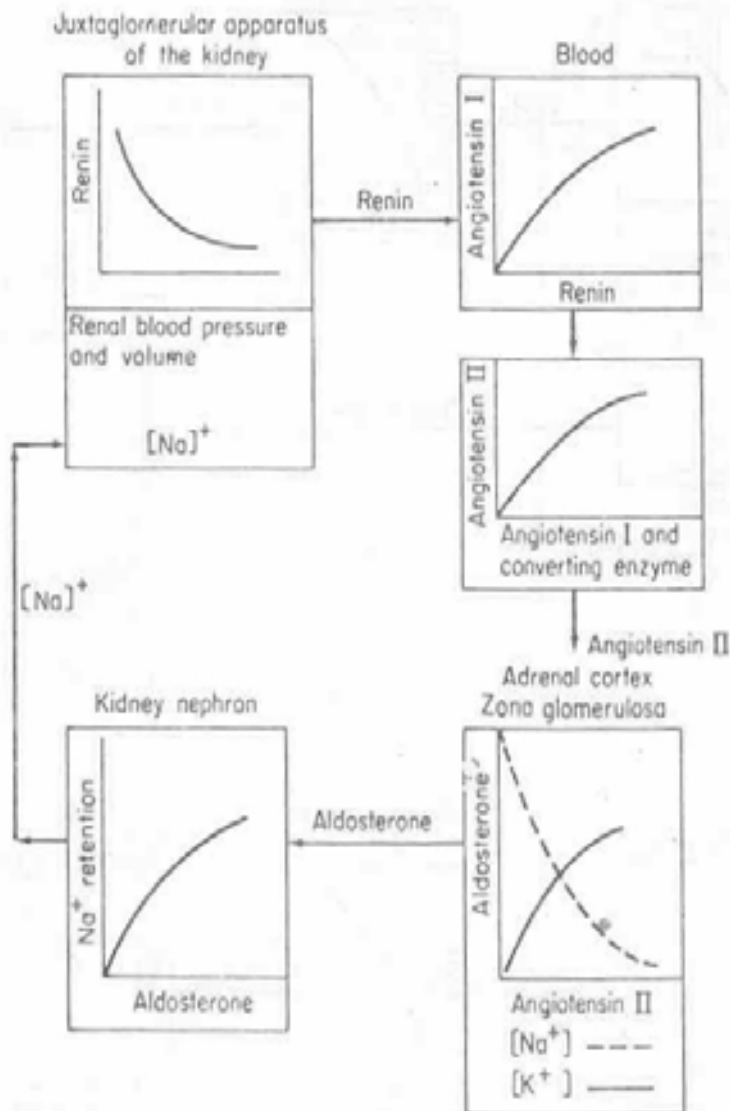
A generalized version of the regulation of the secretion of gonadotrophin in the female mammal (this scheme does not include an action of prolactin on the corpus luteum since this is specific to rodents). (a) FSH secretion by the pituitary gonadotrophic cells is determined by the hypothalamic secretion of FRH. It is assumed that all regulation of gonadotrophic-cell function is mediated via the hypothalamus. The control of hypothalamic function is dual; neural stimuli create a minimal level of function and hormones act as positive-feedback control at low concentrations. In higher concentrations these hormones become negative-feedback controls. Positive-feedback control intensifies the response and persists for a longer period than neural stimuli. (b) LH secretion is controlled by the adenohypophyseal gonadotrophic cells. This mechanism at present appears to be directly superimposable on the pattern for control of FSH secretion.

DIAGRAMA 14



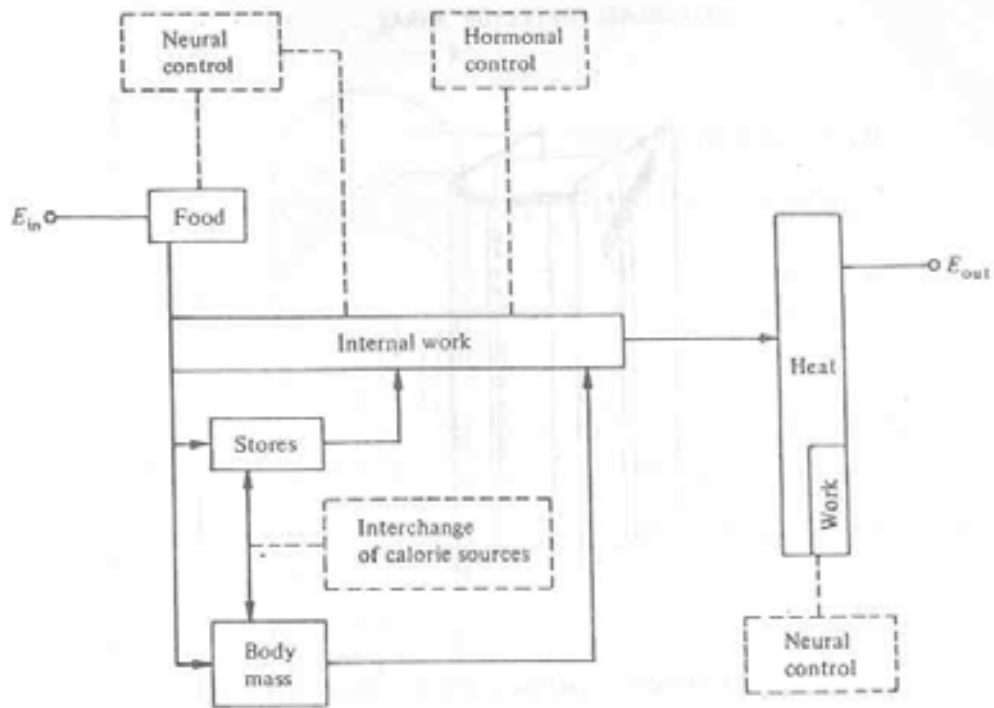
The regulation of gonadotrophin secretion in male mammals. The pathways in the upper part of the diagram (a) describe the regulation of LH secretion and the regulation of spermatogenesis by the resulting secretion of testosterone. (b) describes the regulation of FSH secretion and its action on the seminiferous tubule to contribute to spermatogenesis and perhaps to estrogen secretion. The dotted line indicates that it is not clear whether endogenous estrogens act in this manner.

DIAGRAMA 15



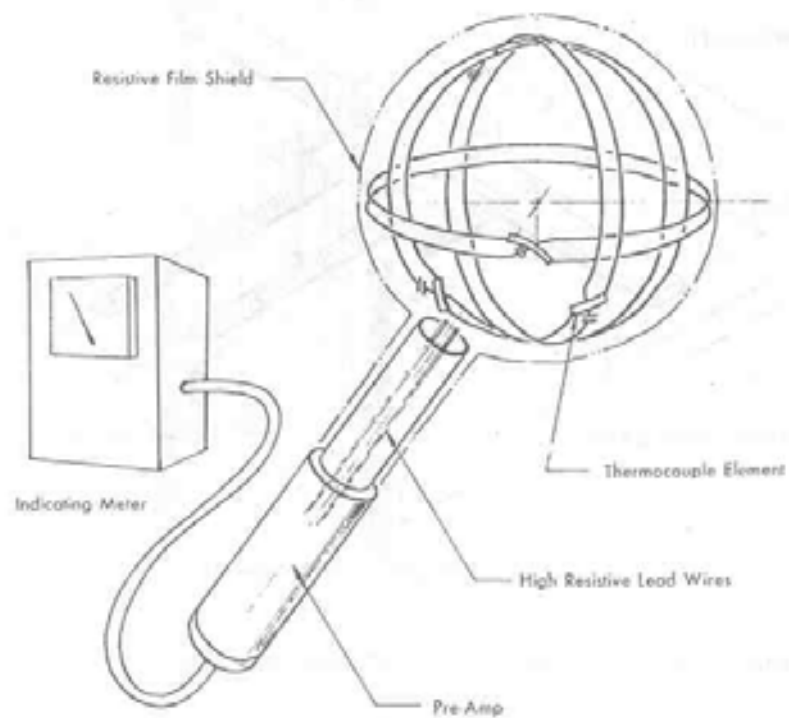
Regulation of the secretion of aldosterone is achieved by the action of angiotensin II on the adrenal cortex. Aldosterone causes an increase in sodium retention. The sodium ion concentration determines the secretion of renin by the juxtaglomerular apparatus and may affect the conversion of corticosterone to aldosterone by increasing the activity of the 18-hydroxy-dehydrogenase when present in low concentrations. The amount of sodium retained also regulates the blood pressure and volume.

DIAGRAMA 16



The caloric model showing the principal paths from energy intake ( $E_{in}$ ) to energy output ( $E_{out}$ )

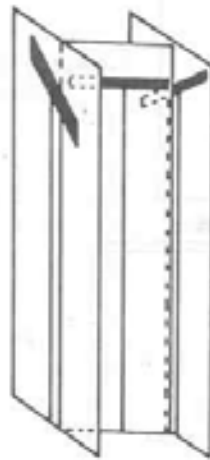
DIAGRAMA 17



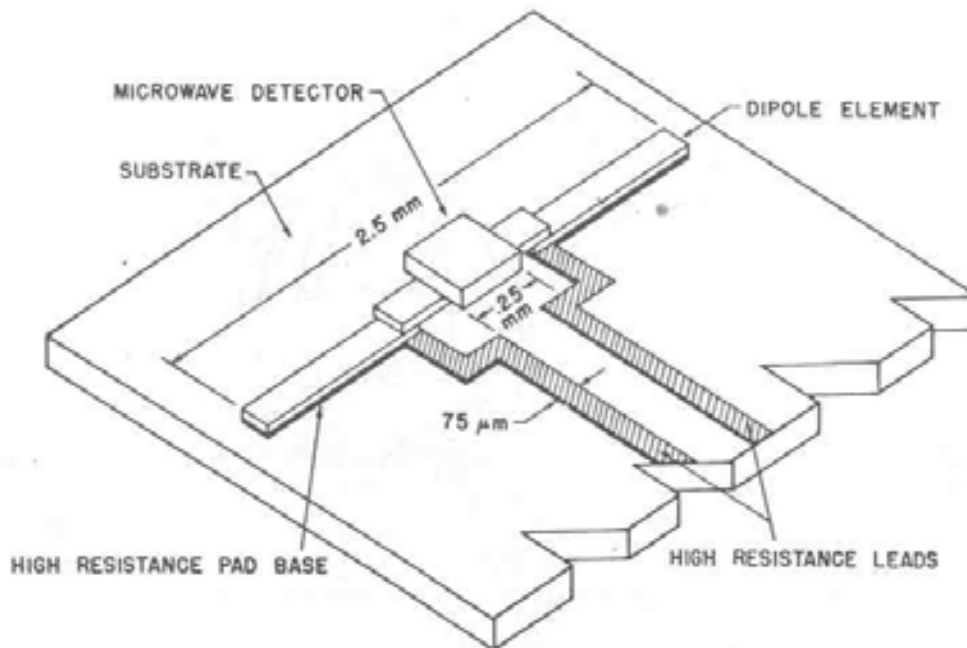
Monitor de RF-MO basado en elementos de termocuplas

DIAGRAMA 18

ORTHOGONAL DETECTOR ARRAY

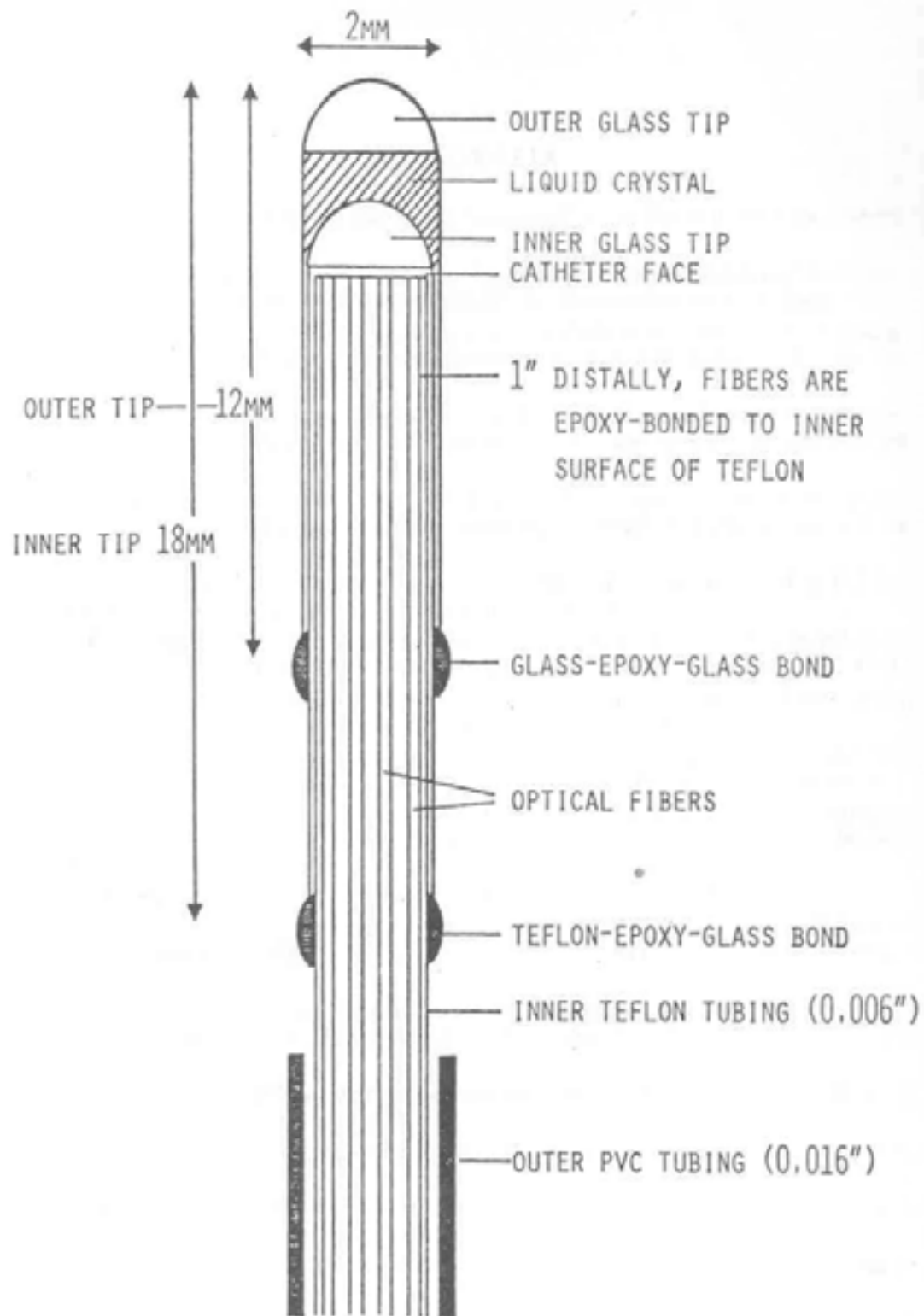


Geometric configuration of a three axis probe.



Details of an individual probe substrate.

Detector de distribución ortogonal. Constituido por diodos.



Sensor de RF-MO del tipo cristal líquido.

DIAGRAMA 20

## Bibliografía

1. J. Frey, "The Growth of Microwave Systems and Applications", Amer. Public Health Assoc., Atlantic City, New York, Nov. 1972, 79-95.
2. Office of Telecommunication Policy. "Program for Control of Electromagnetic Pollution of the Environment", The Assessment of Biological Hazards of Nonionizing Electromagnetic Radiation, March 1973.
3. Office of Telecommunication Policy. "Program for Control of Electromagnetic Pollution of the Environment", The Assessment of Biological Hazards of Nonionizing Electromagnetic Radiation, May 1974, 2nd Report.
4. Office of Telecommunication Policy. "Program for Control of Electromagnetic Pollution of the Environment", The Assessment of Biological Hazards of Nonionizing Electromagnetic Radiation, April 1975, 3rd Report.
5. Office of Telecommunication Policy. "Program for Control of Electromagnetic Pollution of the Environment", The Assessment of Biological Hazards of Nonionizing Electromagnetic Radiation, June 1976, 4th Report.
6. Tell, R. A. and Janes, D. E., "Broadcast Radiation: A Second Look", Annual Meeting of the U.S. National Committee, Int. Union of Radio Science Boulder, CO. October 1975.
7. Tell, R. A., "Environment Nonionizing Exposure. A Preliminary Analysis of the Problem and Continuing Work within EPA". EPA/ORP 73-2 Environmental Exposure to Nonionizing Radiation, 1973, 47-68.
8. Tell, R. A., et al. "An Automated Measurement System for Determining Environmental Radiofrequency Field Intensities II", N.B.S. 75th Symposium, Gaithersburg, MD. March 1976.
9. Rowe, W. R., et al. "An Assessment of Adverse Health Effects of Telecommunications Technology", Nat. Telecom. Conference of Technology Forecasting and Assessment Session, Atlanta, GA. November 1973.
10. Hankin, N. N., et al. "High Power Radiofrequency and Microwave Radiation Sources: A Study of Relative Environmental Significance", 9th Midyear Topical Symposium of the Health Physics Society, February 1976.
11. Jasik, H. (ed.). "Antenna Engineering Handbook." Mc. Graw Hill Book Co., 1961
12. Wacker, P- F., and Bowinan. R. R., "Quantifying Hazardous Electromagnetic Fields: Scientific Basis and Practical Considerations"; IEEE Trans Microwave Theory and Teq. M7T-19. Nº 2. 178-187 - February 1971.
13. Hankin, N. N., "An Evaluation of Selected Satellite Communication Systems as Sources of Environmental Microwave Radiation", Techn. Report Environ. Protection Agency, EPA-52012 74 - 008, December 1974.
14. Tell, R. A., et al. "Aircraft Radar Measurements in the Near Field", Ninth Midyear Topical Symposium of the Health Physics Soc., February 1976.
15. Shinn. D. H., "Avoidance of Radiation Hazards from Microwave Antennas", Marconi Review (GB) 39, 61-80, 1976.

16. Mumford, W. W., "Some Technical Aspects of Microwave Radiation Hazards", *Proc. IRE* 49, 427-447, 1961.
17. Tell, R. A., and Neison, J. C., "Microwave Hazard Measurements Near Various Aircraft Radars", *Radiation Data of Reports* 15, 161-179, 1974.
18. Cain, F. L., et al. "Electromagnetic Effectiveness Investigations of Near Field Obstacle Effects, Antenna Coupling and Phased Arrays", Report ASTIA Doc. AD911 724L, Georgia Institute of Techn. 1973.
19. Palsamino W. A., and Sliney, D. H., "Instrumentation and Methods Used in Microwave Hazard Analysis", *Am. Ind. Hygiene Assoc. Meeting*, 1967.
20. Peak D. W., et al. "Measurement of Power Density from Marine Radar", DHEW Publication, (FDA) 76-8004, July 1975.
21. Hankin, N. N., "Radiation Characteristics of Traffic Radar Systems", U.S. Environmental Protection Agency, Techn. Note ORPIEAD-76-1, March 1976.
22. Tell, R. A., "A Measurement of RF Field Intensities in the Immediate Vicinity of an FM Broadcast Station Antenna, Techn. Note ORPIEAD 76-21 Environ. Protection Agency, 1976.
23. Tell, R. A., "Broadcast Radiation: How Safe is Safe?" *IEEE Spectrum*, 43-51, August 1972.
24. Janes, D. E., et al. "Radio Frequency Radiation Levels in Urban Areas", *IEEE/AP-S Symp. USNC/URIS Meeting*, October 10 - 15, 1976.,
25. Tell, R. A., et al. "An Automate Measurement System for Determining Environmental Radiofrequency Field Intensities". Paper presented at NBS 75th Symposium "Measurements for the Safe Use of Radiation" NBS, Gaithersburg, D., 1976.
26. Tell, R. A., Nelson, J. C. and Hankin, N. N., "HF Spectral Activity in the Washington, D.C. Area." *Radiation Data and Reports* 15, 549 - 558, 1974.
27. Dept. N. H. W., Canada, "Radiation Emitting Devices Regulations, SOR/74-601, 23 October 1974, Part 111 Microwave Ovens". *Canada Gazette Part. 11*, 108, 2822-2825.
28. U.S. Dept. of HEW. "Regulations for Admin. and Enforcement of the Radiation Control for Health and Safety Act of 1968, paragraph 1030. 10 Microwave Ovens", 36 - 37, DHEW Publ. No. (FDA) 75 - 8003, July 1974.
29. Anon. "Safety from Microwave Hazards in Using Microwave Power Equipment - An IMPI Policy Statement", *J. Microwave Power*, 10, 333-341, 1975.
30. Conover, D. L., et al. "Measurement of Electric and Magnetic Field Strengths from Industrial Radiofrequency (1.5 - 40.68 MHz) Power Sources". *USNC/URSI - 1975 Annual Meeting*, Boulder, October 20 - 23, 1975.
31. Stanley, J. L., et al. "Radiation Exposure Considerations When Employing Microwave Excited Spectroscopic Sources". *App. Spectroscopy* 27, 265-267, 1973.
32. Cook, H. F., "The Dielectric Behavior of Some Types of Human Tissues at Microwave Frequencies", *Brit. J. Appl. Phys.* 2, 295, 1951.
33. Cook, H. F., "Dielectric Behaviour of Human Blood at Microwave Frequencies", *Nature*, 168, 247 - 248, 1951.

34. Cook, H. F., "A Comparison of the Dielectric Behaviour of Pure Water and Human Blood at Microwave 1 Frequencies", *British J. Applied Physica* 2, 249-255, 1952.
35. Schwan, H. P., and Li, K., "Capacity and Conductivity of Body Tissues at Ultrahigh Frequencies", *Proc. IRE.* 41, 1735-1740, Dec. 1953.
36. Schwan, H. P. and Piersol, G. M., "The Absorption of Electromagnetic Energy in Body Tissue, Part. 1", *Amer. J. Phys. Med.* 33, 371-404, 1954.
37. Schwan, H. P. and Piersol, G. M., "The Absorption of Electromagnetic Energy in Body Tissue, Part. 11", *Amer. J. Phys. Med.* 34, 425-448, 1955.
38. Schwan, H.P. "Electrical Properties of Tissue and Cell Suspensions" In *Adv. In Biological and Medical. Physics.* 5 Acad. Press, New York, 1957.
39. Schwan, H. P., "Survey of Microwave Absorption Characteristics of Body Tissues", *Techn. Rep. 25*, Moore School of Electrical Eng., University of Pennsylvania, Philadelphia, 1958.
40. Schwan, H. P., *Biophysics of Diathermy in Therapeutic Heat and Cold*, Ed. S. Licht, New Haven, Conn. 63-125, 1965.
41. Schwan, H. P. and Li, K., "The Mechanism of Absorption of Ultrahigh Frequency Electromagnetic Energy in Tissue as Related to the Problem of Tolerance Dosage", *IRE Trans Med Electron*, PG-ME-4, 1956.
42. Baranski, S. and Czerski, P., *Biological Effects of Microwave Radiation*, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pa., 1976.
43. Johnson, C. C. and Guy, A. W., "Nonionizing Electromagnetic Wave Effects in Biological Materials and Systems", *Proc. IEEE* 60, 692-718, 1972.
44. Tell, R. A., "Microwave Energy Absorption in Tissue", *Techn. Rep. PB*, Environmental Protection Agency, February 1972.
45. Anne, A., et al. "Relative Microwave Absorption Cross Sections of Biological Significance" in *Tri-Service Conf. on Biological Effects of Microwave Radiation*, M. F. Peyton, ed. 1961.
46. Kritikos, H. N. and Schwan, H. P., "Hot Spots Generated in Conducting Spheres by Electromagnetic Waves and Biological Implications", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering BME-19*, 53-58, 1972.
47. Kritikos, H. N. and Schwan, H. P., "The Distribution of Heating Potential Inside Lossy Spheres", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering RME-22*, 457-463, 1975.
48. Ho, H. S. and Guy, A. W., "Development of Dosimetry for RF and Microwave Radiation. Part 11: Calculations of Absorbed Dose Distribution in Two Sizes of Muscle Equivalent Spheres", *Health Physics* 29, 317-324, 1975.
49. Shapiro, A. R., "Induced Fields and Heating Within the Cranial Structure Irradiated by an EM Plane Wave", *IEEE Trans. MIT-19*, 187-197, 1971.
50. Weil, C. M., "Absorption Characteristics of Multilayered Sphere Models Exposed to VHF/Microwave Radiation", *IEEE Trans. Biomed. Enging. BME 22*, 468-476, 1975.
51. Kritikos, H. N. and Schwan, H. P., "Formation of Hot Spots in Multilayer Spheres", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 22, 168-172, 1976.

52. Joines, W. T. and Spiegel, R. J., "Resonance Absorption of Microwaves by Human Skull", IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-21, 46-48, 1974.
53. Neuder, S. M., et al. "Microwave Power Density Absorption in a Spherical Multilayered Model of the Head", HEW Publ. (F.D.A.) 77-8011, 199-210, 1976.
54. Johnson, C. C., et al. "Long-Wavelength Electromagnetic Power Absorption in Prolate Spherical Model of Man and Animals", IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique MIT-23, 739-747, 1975.
55. Alien, S. J., et al. "Comparison of Theoretical and Experimental Absorption of Radiofrequency Power", Report SAM-75-52, University of Utah, December 1975.
56. Durney, C. H., et al. "Long-Wavelength Analysis of Wave Irradiation of a Prolate Spheroid Model of Man", IEEE Trans. M77-23, 246-253, 1975.
57. Massoudi, H., et al. "Theoretical Calculations of Power Absorbed by Monkey and Human Prolate Spheroidal Phantoms in an Irradiation Chamber", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 135-157, 1976.
58. Barber, P. W., "Numerical Study of Electromagnetic Power Deposition in Biological Tissue Bodies", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 119-134, 1976.
59. Barber, P. W., "Resonance Electromagnetic Absorption by Nonspherical Dielectric Objects", IEEE Trans. Microwave Theory, Techn. MTT-25, 373-381, 1977.
60. Massoudi, H., et al. "Long-Wave Analysis of Plane Irradiation of an Ellipsoidal Model of Man", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn. MTT-25, 41-46, 1977.
61. Massoudi, H., et al. "Long Wavelength Electromagnetic Power Absorption in Ellipsoidal Models of Man and Animals", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn. MTT-25, 47-52, 1977.
62. Johnson, C. C., et al. "Radiofrequency Radiation Dosimetry handbook", USAF School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base, Report SAM-TR-76-35, September 1976.
63. Gandhi, O. P., "Polarization and Effects on Whole Animal Absorption of R.F. Energy", Proc. IEEE 62, 1171-1175, 1974.
64. Gandhi, O. P., "Strong Dependence of Whole Animal Absorption on Polarization and Frequency of Radiofrequency Energy", Annals of N.Y. Acad. of Science, 247, 532-538, 1975.
65. Gandhi, O. P., "Conditions of Strongest Electromagnetic Power Deposition in Man and Animals", IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. MTT-23, 1021-1029, 1975.
66. Gandhi, O. P., et al. "Distribution of Electromagnetic Energy Deposition in Models on Man with Frequencies Near Resonance", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 44-67, 1976.
67. Gandhi, O. P. et al. "Deposition of Electromagnetic Energy in Animals and Models of Man". Presented at 1976 USNC/URSI Meeting, Amherst, Mass., October 1976.
68. Gandhi, O. P. et al. "Electromagnetic Power Deposition in Man and Animals With and Without Ground and Reflector Effects". Presented at 1976 USNC/URSI Meeting, Amherst, Mass., October 1976.
69. Allen, S. J., et al. "Measurements of Radiofrequency Power Absorption in Monkeys, Monkey Phantoms and Human Phantoms Exposed to 10-50 MHz Fields", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 83-95, 1976.

70. Allen, S. J., "Measurement of Power Absorption by Human Phantoms Immersed in Radiofrequency Fields", Ann., N.Y. Acad. Sci. 247, 494-498, 1975.
71. Guru, B. S. and Chen, K. M., "Experimental and Theoretical Studies on Electromagnetic fields induced inside finite biological bodies", IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique MTT-24, 433-440, 1976.
72. Chen, K., et al. "Quantification and Measurement of Induced Fields Inside Finite Biological Bodies", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 19-43, 1976.
73. Bussey, H. E. and Richmond, J. H., "Scattering by a Lossy Dielectric Circular Cylindrical Multilayer, Numerical Values", IEEE Trans. of Vol. AP. -23, 723-725, 1975.
74. Ho, H.S. "Dose Rate Distribution in Triple Layered Dielectric Cylinder with irregular Cross Section Irradiated by Plane Wave Sources". J. Microwave Power 10, 423-432, 1975.
75. Ho, H. S., "Energy Absorption Patterns in Circular triple Layered Tissue Cylinders Exposed to Plane Wave Sources", Health Physics 31, 97-108, 1976.
76. Guy, A. W., "Electromagnetic Fields and Relative Heating Patterns Due to a Rectangular Aperture Source in Direct Contact with Bilayered Biological Tissue IEEE Trans. MTT-19, 214-220, 1971.
77. Ho H.S. et al "Microwave Heating of Simulated Human Limbs by Aperture Sources", IEEE Trans. MTT-19, 724-231, 1971.
78. Lin, J. C., "Interaction of Electromagnetic Transient Radiation with Biological Materials", IEEE Trans. EC-17, 93-97, 1975.
79. Lin, J.C. and Lan, C.K., "Coupling of Gaussian Electromagnetic Pulse into a Muscle bone Model of Biological structure", J. Microwave Power 11, 67-75, 1976.
80. Bowman, R. R., "Some Recent Developments in the Characterization and Measurement of Hazardous Electromagnetic Fields", Proc. International Symposium, Warsaw, 217-227, October 1973.
- 81- Guy, A. W., "Engineering Considerations and Measurements", AGARD Lecture Series N- 78 on Radiation Hazards, 9:1 - 9:36, 1975.
82. Ruggera, P. S. "E and H Field Instrumentation and Calibration Below 500 MHz" HEW publ. (FDA) 77-8011, 281-286, 1976.
83. Hopfer, S., "The Design of Broad-Band Resistive Radiation Probes", IEEE Trans. IM-21, N- 4, 416- 421, November 1972.
84. Aslan, E., "Broad-Band Isotropic Electromagnetic Radiation Monitor" IEEE Trans. Ins. Measurement IM-21, 421-424, 1972.
85. Bassen, H. and Peterson, R., "complete measurement of electromagnetic Fields with Electro-Optical Crystals", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 310-323, 1976.
86. Bassen, H., Herman, W. and Hoss, R., "EM probe with Fiber Optic Telemetry System", Microwave Journal 20, 35-39, 1977.
87. Rozzell, T. C., et al. "A Non-perturbing Temperature Sensor for Measurements in Electromagnetic Fields, J. Microwave Power 9, 241-249, 1974.

88. Johnson, C. C., Rozzell, T. C. and Gandhi, O. P., "Liquid Crystal Fiberoptic RF Probes" *Microwave Journal* 18, N° 8, 55-60, 1975.
89. Johnson, C. C., et al. "Fiberoptic Liquid Crystal Probe for Absorbed Radiofrequency Power Temperature Measurement in Tissue During Irradiation", *Annals of New York Acad. of Sciences* 247, 527-531, 1975.
90. Livingston, G. K. et al. "Performance of the LCOF Probe in Calorimetric and Tissue Temperature Monitoring Application", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 239-248, 1976.
91. Cetas, T. C., "A Birefringent Crystal Optical Thermometer for Measurement of Electromagnetically Induced Testing", HEW pubj. (FDA) 77-8011, 338-355, 1976.
92. Brodwin, M. E., Taflove, A. and Matz J. E., "A passive Electrodeless Method of Determining the Interior Field of Biological Materials", *IEEE Trans. Ins. AIYT-24, N- 8*, 514-521, 1976.
93. Guy, A. W., "Analyses Of Electromagnetic Fields Induced in Biological Tissues by Thermographic Studies on Equivalent Phantom Models", *IEEE Trans. MIT-19*, 205-214, 1971.
94. Guy, A. W., "Quantipation of Induced Electromagnetic Field Patterns In Tissue and Associated Biologic Effects", *Proc. International Symposium, Warsaw, October 1973*, 203-216.
95. Bertreau, A. J. and Dardalhou, M., "Biological Effect of Microwaves". Presented at 7th European Miero- wave Conference, Copenhagen, September 1977.
96. Cicary, S. F., "Considerations in the EvaluatiOn Of the Biological Effects of Exposure to Microwave Radiation", *Am. Industrial Hygiene Assoc. J.* 31, 52-59, 1970.
97. Cleary, S. F., "Biological Effects of Microwave and RF Radiation", *CRC Critical Reviews in Environmental Control* 2, 257-306, 1970.
98. Cicary, S. F., "Uncertainties in the Evaluation of the Biological Effects of Microwave and Radiofrequency Radiation", *Health Physics* 25, 387-404, 1973.
99. Emery, A. F., et al. "The Numerical Therinal Simulation of the Human Body When Absorbing Nonionizing Microwave Irradiation with Emphasis on the Effect of Different Sweat Models", HEW Publ. (FDA) 77-8011, 96-118, 1976.
100. Schwan, H. P., "Effects of Microwave Radiation on Tissue; A Survey of Basic Mechanisms", *Nonionizing Radiation* 1, 23-31, 1969.
101. Schwan, H. P. and Sher, L. D., "Alternating Current Field- Induced Forces and Their Biological Implications", *J. Electrochem. Society* 116, 22C-26C, 1969,
102. Schwan, H. P., "Nonionizing Radiation Hazards", *Journal of the Franklin Institute-* 296, 485-497, 1973.
103. Lebovitz, R. M., "Caloric Vestibular Stimulation via UHF - Microwave Radiation", *IEEE Trans. biomedical Eng. BME-20*, 114-126, 1973.
104. *Biological Effects of Electromagnetic Field*, Swedish Academy of Engineering Sciences, Stockholm, 1976.
105. Illinger K. H., "Molecular Mechanisms for Microwave Absorption in Biological Systems" Symp. Proc. BRH/DBE 70.2, Richmond, Virginia, 112-116, September 1969.
106. Schwan, H - P., "Principles of Interaction of Microwave at Cellular and Molecular Lever' Porc. Int. Symp. Warsaw, October 1973, 152-159.

107. Hill, N. E.; Vaughan, W. E.; Price, A.H. and Davies, M., Dielectric Properties and Molecular Behaviour, Van Nostrand, London, 1969.
108. Rabinowitz, J. R., "Possible Mechanisms for the Biomolecular Absorption of Microwave Radiation with functional Implications", IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. M77-21, 850-851, 1973.
109. Vogelhut, P.Q. "Interaction of Microwave and Radio Frequency Radiation with Molecular Systems", Symposium Proceedings, BRH/DBE 70-2, 98-100, Richmond, Virginia, September 1969.
110. Illinger K. H., "Interaction between Microwave and Millimeter Wave Electromagnetic Fields and Biological Systems Molecular Mechanisms", Proc. Int. Symp. Warsaw, 160-172, October 1973.
111. Frohlich, H., "Evidence for Bose Condensation-like Excitation of Coherent Modes in Biological Systems", Physics Letters 51A, 21-22, 1975.
112. Schwan, H. P., "Microwave Radiation: Biophysical Consideration and Standard Criteria", IEEE BME-19, 302-312, 1972.
113. Schwan, H. P., "Alternating Current Spectroscopy of Biological Substances", Proc. IRE 47, 1841-1855, 1959.
114. Schwan H. P., "Interaction of Microwave and Radio Frequency Radiation with Biological Systems", IEEE Trans. MTT-19, 146-152, 1971.
115. Presman, A. S., Electromagnetic Fields and Life, Tzdatelstvo Nauka, Moscow, 1968. Trans. Plenum Press, New York, 1970.
116. Michaelson, S. M., "The Tri-Service Program - A Tribute to George M. Knauf, USAF (MC)", IEEE Trans. AITT-19, 131-146, 1971.
117. Tyler' P. E., "Overview of the Biological Effects of Electromagnetic Radiation", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems AES-9, No 21 Mar. 1973, 225-228.
118. Michaelson, S. M., "Biologic and Pathophysiologic Effects of Exposure to Microwave and Ultrasonic Energy - An Overview", AGARD Lecture Series, N' 78, Radiation Hazards, 1975.
119. Marha, K.; Musil, J. and Tuha, H., Electromagnetic Fields and the Living Environment State Health Publishing House, Prague Czechoslovakia, Trans. SBN 91130;-13-7, San Francisco Press inc., 1971.
120. Dodge, C. H. and Glaser, Z. -R., "Trends in Electromagnetic Radiation Bioeffects Research and Related Occupational Safety Aspects", J. Microwave Power 12, N' 4, 1977.
121. Glaser, Z. R.; Brown, P. F. and Brown, M. S., "Bibliography of Reported Biological Phenomena and Clinical Manifestations Attributed to Microwave and Radio-Frequency Radiation: Compilation and Integration Of Report and Seven Supplements", Naval Medical Research institute Report, 1976.
122. Glaser, Z. R. and Brown, P. F., "Eighth Supplement to Bibliography of Reported Biological Phenomena and Clinical Manifestations Attributed to Microwave and Radio-Frequency Radiation", Naval Medical Research Institute Report (AD A029-430), 1976.
123. Rendler, E., "Cutaneous Receptor Response to Microwave Irradiation", Thermal Problems in Aerospace Medicine, ed. Y.D. Hardy, Surrey, England, 149-161.

124. Michaelson, S. M., "Cutaneous Perception of Microwaves", *J. Microwave Power* 7, 67-73, 1972.
125. Michaelson, "Human Exposure to nonionizing Radiant Energy - Potential Hazards and Safety Standards", *Proc. IEEE*, 60, 1972, 589-421.
126. McLees, B. D., and Finch, E. D. "Analysis of Reported Physiologic Effects of Microwave Radiation", *Advances in Biological and Medical Physics*, ed. J. H. Lawrence and J. W. Gofman, Acad. Press, 14, 163-223, 1973.
127. Michaelson, S. M., "Thermal Effects of Single and Repeated Exposures to Microwaves - A Review", *Proc. Intern. Symp. Warsaw*, October 1973, 1-14.
128. Gordon, Z. V., *Biological Effect of Microwaves in Occupational Hygiene*, Izdatelstvo Medicina, Lenin-grad, 1966; trans. TT 70-50087, NASA TT F-663, 1970.
129. Phillips, R. D., King, N. W., and Hunt, E. L., "thermoregulatory, Cardiovascular and Metabolic Response of Rats to Single and Repeated Exposure to 2450 MHz Microwaves". Presented at 8<sup>th</sup> Annual Microwave Power Symp., Loughborough, England, 1973.
130. Addington, C. H., Oshorn, C., Swam, G., Fisher, F. P., Neubauer, R. A. and Sarkees, Y. T., "Biological Effects of Microwave Energy at 200 me", *proc. IV Annual Tri-Service Conference. Biological Effects of Microwave Radiation*, 1, 177-186, Pienuin Press, 1961
131. Baranski, S., Czekalinski, L, Czernski, P, and Haduch, S., "Recherches experimentales sur l'effet mortel de l'irradiation des ondes microfletriques", *Rev. Med. Aeron*, 2, 108, 1963.
132. Ely, T. S., Goldman, D. E, and Hearon, J. F., "Heating Characteristics of Laboratory animals Exposed to Ten-centimeter Microwave", *IEEE Trans. Bio-Med. Eng.* li, 123, 1964.
133. Austin, G. M., Horwath, S. M., "Production of Convulsions in Rats by Exposure to ultrahigh Currents", *Am. J. Phys. Med.*, 33, 141, 1954.
134. Searle, O. W., Imig, C. J., and Dahlen, R. W., "Studies with 2430 me CW Exposure to the Heads of Dogs", *Proc. 11 Tri-Service Conf. on Biological Effects of Microwave Energy*, July 1958, ASTIA doe AD 131477.
135. Daily, L., Wallin, K. G., Herrick, Y. F. and Par"ijj, E. M., "Effects of Microwave Diathermy on the Eye", *Amer. J. Physiol*, 155, 482, 1948.
136. Richardson, A. W., Duane, T. D. and Hines, H. M., "Experimental Lenticular Opacities Produced by Microwave Irradiation", *Arch. Phys. Med.*, 29, 765-769, 1948.
137. Oshome, S. 'L., and Frederick, J. N., "Microwave Radiation: Heating of Human and Animal Tissue by Means of High Frequency Current with Wavelength of Twelve Centimeters", *J. Amer. Med. Assco.*, 137, 1030-1040, 1948.
138. Carpenter, R. L., Ferri, E. S., and Hagan, G. J., "Assessing Microwaves as a Hazards to the Eye Progress and Problems", *Proc., Intern. symp. Warsaw, Poland*, Oct. 1973, 178-185.
139. Carpenter, R. L., Biddle, D. K., and Van Ummersen, C. A., "Opacities in the lens of the Eye Experimentally Induced by Exposure to Microwave Radiation", *IRE Trans. on Medical Electronics*, ME-7, 152-157, 1960.

140. Carpenter, R. L., Biddle, D. K., and Van Umfiersen, C. A., "Biological Effects of Microwave Radiation with Particular Reference to the Eye", Proc. 3rd intern. Conf. on Medical Electronics, London, England, 1960, 401-408.
141. Carpenter, R. L., and Van Ummersen, C. A., "The Action of Microwave Radiation of the Eye", J. Microwave Power, 3, 3-19, 1968.
142. Carpenter, R. L., "Experimental Microwave Cataract: A Review". Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation, ed. S.F. Cleary, Symp. Proc., Richmond, Virginia, 1969, 76-81.
143. MeRee, D. I., "Thresholds for Lenticular Damage in the Rabbit Eye Due to Single Exposure to CW Microwave Radiation", Health Physics, 21, 763-769, 1971.
144. Miroy, W. C., and Michaelson, S. M., "Microwave Cataractogenesis: A Critical Review of the Literature". Aerospace Medicine, 43, 67-75,,1972.
145. Mitchel, J. C., "Electromagnetic Radiation: Effects on the Eye". AGARD Lecture Series N' 78, 1975.
146. Guy, W., Lin, J. C., Kramar, P. O. and Emery, A. F., "Effect of 2450-MHz Radiation of the Rabbit Eye". IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. MIT-23, N' 6, 492-498, June 1975.
147. Kremer, P. O., Emery, A. F., Guy, A. W. and Lin, J. C., "The Ocular Effects of Microwaves on Hypothermic Rabbits: A Study of Microwave Cataractogenic Mechanisms", Annals of N.Y. Academy of Sciences, 47, 155-165, 1975.
148. Kremer, P., Harris C., Guy, A. W. and Emery, A., "Mechanism of Microwave Cataractogenesis in Rabbits", HEW Publ. (FDA) 77-8010, 49-60, 1976.
149. Birenbaum, L., Kaplan, I. T., Metiay, W., Rosenthal, S. W., Schnidit, H. and Zaret, M. M., "Effects of Microwaves on the Rabbit Eye", J. Microwave Power, 4, 232-243, 1969.
150. Carpenter, R. L., Hagan, G. J. and Ferri, E. S., "Use of a Dielectric Lens for Experimental Microwave Irradiation of the Eye" Annals N. Y. Acad. Sciences, 47 142-154, 1975.
151. Hagan, G. J. and Carpenter, R. L., "Relative Cataractogenic Potencies of Two Microwave Frequencies (2.45 and 10 GHz)", HEW Publ. (FDA) 77-8010, 143-155, 1976.
152. Appleton, B., Hirsch, S. E. and Brown, P. V. K., 'Investigation of Single Exposure Microwave Ocular Effects at 3000 MHz", Annals N. Y. Acad. Sciences, 47, 125-134, 1975.
153. Cogan, D. G., Fricker, S. J., Lubin, M., Donaldson, D. D. and Hardy M., "Cataracts and Ultra-High Frequency Radiation". A.M.A. Indusi. Health, 18, 299-302, 1958.
154. Ferri, E. S. and Hagan, G. J., "Chronic Low - Level Exposure of Rabbits to Microwaves", HEW Publ. (FDA) 77-8010, 129-142, 1976.
155. Rosenthal, S. W., et al. "Effects of 35 and 107 GHz CW Microwaves on the Rabbit Eye", HEW Publ. (FDA) 77-8010, 110-128, 1976.

156. Taflove, A. and Brodwin, M. E., "Computations of the Electromagnetic Fields and Induced Temperatures Within a Model of the Microwave Irradiated Human Eye", IEEE Trans. Microwave Theory Techn., MTT-23, 888-896, 1975.
157. Baillie, H. D., Heaton, A. G. and Pal, D. K., "The Dissipation of Microwaves as Heat in the Eye", Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation, ed. S.F. Cleary Symp. Proc. Richmond, Virginia, 85-89, 1969.
158. Pauisson, L. E., "Measurements of 0,915, 2.45 and 9,0 GHz Absorption in the Human Eye". Presented at 1976 European Microwave Conf.
159. Williams, R. J. and Finch, E. D., "Examination of the Cornea Following Exposure to Microwave Radiation", Aerospace Medicine 45, 393-396, 1974.
160. Weiter, J. J., Finch, E. D., Schultz, W. and Frattali, V., "Ascorbic Acid Changed in Cultured Rabbit Lenses after Microwave Irradiation", Annal N. Y. Acad. Sciences 47, 175-181, 1975.
161. Baillie, H. D., "Thermal and Nonthermal Cataractogenesis by Microwaves", Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation, ed. S.F. Cleary. Symp. Proc. Richmond" Virginia, 1969, 59-65.
162. Hetier, H. and Texeira,Pinto, A., "A new Physical Method of Creating Chromosomal Aberrations", Nature, 183, 905-906, 1959.
163. Heller, J. H., "Cellular Effects of Microwave Radiation", Symp. Proceedings, Richmond, Virginia, 1969. US. DHEW, BRH/DBE 70-2, 116-121.
164. Michaelson, S. M., "Microwave and Radiofrequency Radiation", World Health Organization, Document ICP/CEP 803, 1907.
165. Yao, K. T. S. and Jiles, M. M., "Effects of 2450 MHz Microwave Radiation on Cultivated Rat Kangaroo Cells", Symp. Proceeding, Richmond, Virginia. 1969. US. DHEW, BRH/DBE 70-2, 123-133.
166. Baranska, W., "Symphoblastoid Transformation of Lymphocytes in Vitro after Microwave Irradiation", Nature, 214, 102. 1967.
167. Baranska, W. S., "The Effects of Microwaves on Human Lymphocyte Cultures". Proc. Intern. Symp. Warsaw, Poland, October 1973, 189-195.
168. Baranski, S., Czerski, P. and Szmigiejski, S., "Microwave Effects on Mitosis, in Vivo and in Vitro", Genetica Polonica, 10, N° 3-4, 1969.
169. Baranski, S., "Effects of Microwaves on the Reactions of the White Blood Cells System", Acta Physiol. 23, 685-692, 1972.
170. Smialowicz, R. J., "The Effects of Microwaves (2450 MHz) on Lymphocyte Blast Transformation on Vitro", HEW Publication (FDA) 77-8010, Vol. 1. 472-483, 1976.
171. Elder J.A. and Ali, J. S., "The effect of Microwaves (2450MHz) on Isolated Rat Liver Mitochondria", Annals of New York Acad. of Sciences, 247, 251-262, 1975.
172. Bawin, S. M.; Sheppard, A. R. and Adey, W. R., "Models of Long - Range Order in Cerebral Macromolecules: Effects of ELF, VHF and UHF Fields in Calcium Binding". presents at 1977 International Symposium on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, October 30-November 4, 1977.

173. Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane S. G. and Eichenger, D. C., "Two Parameters Affecting Radiation Induced Calcium Efflux from Brain Tissue". Presented at 1977 Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, October 30-November 4, 1977.
174. Janiak, M. and Szmigieiski, S., "Injury of Cell Membranes in Normal and SV40-Virus Transformed Fibroblasts Exposed in Vitro to Microwave (2450MHz) or Water-Bath Hyperthermia (43°C)". Presented at 1977 Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, October 30-November 4, 1977.
175. Lin, L. M. and Cleary, S. F., "Effects of Microwave Radiation on Erythrocyte Membranes". Presented at 1977 Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, October 30-November 4, 1977.
176. Livingston, G. K., Johnson, C. C. and Dethlefsen, L. A., "Comparative Effects of Water Bath - and Microwave Induced Hyperthermia on Cell Survival and Sister Chromatid Exchange (SCE) in Chinese Hamster Ovary (CHO) Cells". Presented at 1977 Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, October 30-November 4, 1977.
177. Allis, J. W. and Fronme, M. L., "Activity of Membrane- Bound Enzymes Exposed to Amplitude Modulated 2450MHz Radiation". presented at 1977 intern. Symp. On Biological Effects of Electromagnetic Waves. Airlie, Virginia, October 30-November 4, 1977.
178. Blaekman, C. F.; Benane, S. G., Weil, C. M. and Ali, J. S., "Effects of Nonionizing Electromagnetic Radiation on Single Cell Biologic Systems", *Annals of N. Y. Acad. Sciences* 247, 352-366, 1975.
179. Webb, S. J. and Dodds. D. D., "Inhibitions of Bacterial Cell Growth by 136GHz Microwaves", *Nature* 218, 374-375. 1968.
180. Corelli, J. C.; Gutmann, R. J.; Kohazi, S. and Levy, J., "Effects of 2.6-4.0 GHz Microwave Radiation on E. Coli B". *J. Microwave Power* 12, N° 3, 1977.
181. Blackman, C. F., Surtes, M. C. and Benane, S. G., "The Effect of Microwave Exposure on Bacteria: Mutation Induction", *HEW Publication (FDA) 77-8010*, vol. 1, 406-413, 1976.
182. Cleary, S. F., "Biological Effects of Microwave and Radio-frequency Radiation". *CRC Crit. Rev. in Environmental Control*, vol.2, 121-166, 1977.
183. Allis, J. W., "Irradiation of Bovine Serum Albumin with a Crossed-Beam Exposure-Detection System", *Annals N.Y. Acad. Sciences*, 247, 312-322, 1975.
184. Klainer, S. M., Frazer. J. W., "Raman Spectroscopy of Molecular Species During Exposure to 100MHz Radiofrequency Fields". *Annals N. Y. Acad. Sciences*, 247, 323-326, 1975.
185. Deichmann, N. B.; Miale, J. and Landeen, K., "Effects of Microwave Radiation of the Hemopoietic System of the Rat", *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 6, 71-77, 1964.
186. Kitsouskaya, 1. A., "The Effect of Centimeter Waves of Different Intensities on the Blood and Hemo- poictie Organs of White Rats", *Gig. Tr. Prof. Zabal.*, 8, N' 14, 1964.
187. Djordjevie, Z.; Lazarevie, N. and Djokvic, V., "Studies on the Hemotologic Effects of Long - Term, Low- Dose Microwave Exposure", *Aviation, Space and Environ. Medicine*, 48, 516-518, 1977.

188. Smialowiez, R. J.; Kinn, J. B.; Weil, C. M. and Ward, T. R., "Chronic Exposure of Rats at 425 or 2450MHz: Effects on Lymphocytes". Presented at 1977 Intern Symp. on the Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, Nov. 1977.
189. Czerski, P., "Microwave Effects on the Blood-Forming System with Particular Reference to the Lymphocyte", *Annals N. Y. Acad. Sci.* 247, 232-242, 1975.
190. Rotkowska, D., and Vacek, A., "Effect of High Frequency Electromagnetic Field upon Hemopoietic Stem Cells in Mice", *Folia Biologica (Plague)*, 18, 292-297, 1972.
191. Rotkowska, D., and Vacek, A., "The Effect of Electromagnetic Radiation on the Hematopoietic Stem Cells of Mice", *Annals N. Y. Acad. Sciences*, 247, 243-250, 1975.
192. Lin, J. C., Neison, J. C., Ekstrom, M. E., and Nam, S. H., "Effects of Radio Waves on Growth, Hematology and Histology of Mice". Presented at 1977 International Symposium on the Biological Effects- of Electromagnetic Fields, Airlie, Virginia, 1977.
193. Krupp, J. H., "The Relationship of Thermal Stress to Immune System Response in Mice Exposed to 2.6 GHz Radio-Frequency Radiation". Presented at 1977 International Symposium on the Biological Effects of Electromagnetic Fields, Airlie, Virginia, 1977.
194. Baranski, S., "Effect of Chronic Microwave Irradiation on the Blood Forming System of Guinea Pigs and Rabbits", *Aerospace Medicine*, 42, 1196-1199, 1971.
195. Czerski, P., Sionka, E. P., Sickierzynsky' M., and Stolarski, A., "Influence of Microwave Radiation of the Hematopoietic System", *Proc. International Symp.*, Warsaw, Poland, October 1973, 67-74.
196. Michaelson, S. M., Thompson, R. A. E., Tamani, M. Y. E., Seth, H. S and Howland, J. W., "The Hematologic Effects of Microwave Exposure", *Aerospace Medicine*, 35, Si4-829, J964.
197. Michacison, S. M., Howianci, J. W., and Deichmann, W. B., "Response of the dog to 24.000 and 1285 MHz Microwave Exposure", *Industrial Medicine*, 40, 18-23, 1971.
198. Krupp. J. H., "Long -Term Follow-up Macaca Mulatta Exposed to High Power Levels of 15, 20 and 26 MHz Radiofrequency Radiation". Presented at 1977 International Symp. on the Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
199. Lovely, R. H., Sparks, T. J., and Guy, A. W., "Response to Lymphocytes in Vitro to 30 MHz Radio-Frequency Fields". Presented al 1977 International Symp. on the Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
200. Wangemann, R. T., and Cicary, S. F., "The in Vivo Effects of 2.45 GHz Microwave Radiation of Rabbit Serum Components and Sleeping Times", *Radiat. Environ. Biophysica*, 13, 89-103, 1976.
201. Ely, T. S., Goldman, D. E., and Hearon, j. Z., "Heating Characteristics of Laboratory Animals Exposed to Ten-Centimeter Microwaves, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BE-11, 123, 1964.
202. Muraca Jr., G. J., Ferri, E. S., and Buchta, F. L., "A Study of the Effects of Microwave Irradiation of the Rat Testis", *HEW Publication (FDA) 77-8010*, 1, 484-494, 1976.
203. Varma, M. M., and Traboulay, E. A., "Biological Effects of Microwave Radiation on the Testes of Mice" *Experientia*, 31, 301, 1975.
204. Berezintskaya, A. N., "Some Indicies of Fertility of Female Mice Irradiated with 10 cm Microwaves", *Gigiena Truda i Professionalnye Zebolevaniye*, 9, 33, 1968.

205. Pobzhitkov, Y. A., Tyagin, N. V., and Grebeshechkmikova, A. M., "The Influence of Pulsed Super-High Frequency Fields on Conception and the Course of Gestation in White Mice", *Bul. Exper. Biol. and Med.*, 51, 105, 1961.
206. Deichmann, W. B., Bernal, E., Stephens, E. H. and Landeen, K., "Effects on Dogs of Chronic Exposure to Microwave Radiation", *J. Occup. Med.* 5, 418, 1963.
207. Michaelson, S. M., Howland, J. W., and Deichmann, W. B., "Response of the Dog to 24.000 and 1284 MHz Microwave Exposure", *Indust. Med. Surg.*, 40, 18, 1971.
208. Miro, L., Lonbiere, R., and Pfister, A., "Recherches des lésions viscérales observées chez des souris et des rats exposés aux ondes ultra-courtes, Etude particulière des effets de ces ondes sur la reproduction de ces animaux", *Rev. Med. Aeronaut. (Paris)*, 4, 37, 1965.
209. Dietzel, F., "Effects of Nonionizing Electromagnetic Radiation on the Development and Intrauterine Implantation of the Rat", *Ann. N. Y. Acad. Science*, 247, 367-376, 1975.
210. Shore, M. L., Feiton, R. D., and Lamanna, A., "The Effect of Repetitive Prenatal Low - Level Microwave Exposure on Development in the Rat". HEW Publication (FDA) 77-8026, 280-289, 1977.
211. Michaelson S. M., Guillet, R. and Heggene ss, F. W., "The Influence of Microwaves on Development of the Rat" Presented at the 1977 Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, Nov. 1977.
212. Johnson, R. B., Mizumari, S., Myers, D. E., Guy, A. W. and Lovely, R. H., "Effects of Pre- and Post- Natal Exposures to 918 MHz Microwave Radiation on Development and Behavior in Rats". Presented at the 1977 Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
213. Rugh, R., Ginns, E. I., Ho, H. S. and Leach, W. M., "Are Microwaves Teratogenic?", *Proc. Intern. Svmp., Warsavt., Poland*, October 1973, 98-107.
214. Chernovetz, M. E., Justesen, D. R., King, N. W. and Wagner, J. E., "Teratology, Survival and Reversal Learning after Fetal Irradiation of Mice by 2450 MHz Microwave Energy", *J. Microwave Power* 10, 391, 1975.
215. Van Ummersen, C., "The Effect of 2450 me Radiation on the Development of the Chick Embryo", *Biological Effects of Microwave Radiation* 1, 201, N.Y. Press Plemun, 1961.
216. Fisber, P., Lauber, J. K. and Voss, W. A. G., "Effects of Chronic Exposure to Microwaves at Low Power ze of Developing Chicken Embryos". Presented at the 1977 Intern. Densities on the Mass and Cranial Si. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
217. McRee, D. I., Hamrick, P. E. and Tinki, J., "Sonic Effects of Exposure of the Japanese Quaij Embryo to 2.45 GHz Microwave Radiation", *Ann. N.Y. Acad. Science* 247, 377, 1975.
218. Carpenter, R. L. and Livstone, E. M., "Evidence for Non-Thermal Effects of Microwave Radiation: Ah- normal Development of Irradiated Insect Pupae", *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques* M7T-19, 173\_ 178, 1971.
219. Lindaucr, G. A., Liu, L. M., Skewes, G. W. and Rosenbaum, F. J., "Further Experiments Seeking Evidence of Non-Thermal Biological Effects of Microwave Radiation", *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques* M77-22, 790-793, 1974.

220. Liu, M. L., Rosenhaun, F. J. and Pickard, W. F., "The Relation of Teratogenesis in *Tenebrio Molitor* to the incidence of Low - Level Microwaves", IEEE Trans. Microwave Theory Techniques MTT-23, 929- 931, 1975.
221. Green, Jr., D. R., Rosenbaum, F. J. and Pickard, W. F., "Biological Effects of Microwaves on the Pupae of *Tenebrio Molitor*", HEW Publication (FDA) 77-8026, 253-262, 1977.
222. Pickard, W. F. and Olsen, R. G., "Development Effects of Microwaves in *Tenebrio Molitor*: Experiments to Detect Possible Influences of Radiation Frequency and of Culturing Protocols". Presented at the 1977 Intern. Symp. on the Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlies, Virginia, November 1977.
223. Cooper, T., Pinakatt, T., Jellinek, M. and Richardson, M., "Effects on Adrenalectomy Vagotomy and Ganglionic Blockade on the Circulatory Response to Microwave Hyperthermia" Aerospace Med. 23, 794, 1962.
224. Presman, A. S. and Levitina, N. A., "Non-Thermal Action of Microwaves on Cardiac Rhythm - Part 1 Action Of Continuous Microwaves", Bull. Exp. Biol. med., \_53, 36-39, AD 288404, 1963.
225. Presman, A. S. and Levitina, N. A., "Non-Thermal Action of Microwaves on Cardiac Rhythm - Part II Action of Pulsed Microwaves", Bull. EXP. Biol. Med., 53, 15488, AD 283882, 1963.
226. Kaplan, I.T. Mellay, W., Zaret, M. M., Birenbaum, L. and Rosenthal, S. W., "Absence of Heart-Rate Effect in Rabbits During Low - Level Microwave Irradiation", IEEE Trans- Microwave Theory Techniques MTT-19, 168-173, 1971.
227. McAfec, R. D., "Neurophysiological Effects of 3 cm Microwave Radiation", Amer. J. Physiol. 200, 192, 1961.
228. Subbota, A. G., "Respiratory System, Cardiovascular System and Blood", Influence of Microwave Radiation in the Organism of Man and Animals, ed. I R. Petrov NASA TT-F-708, 1972.
229. Michaelson, S. M Houk, W. M., Lebda, N. J. A. Lu, S. T. and Magin, R. L., "Biochemical and Neuroendocrine Aspects of Exposure to Microwaves", inn. N.Y. Acad. Sci. 247, 21-45, 1975.
230. Dumanskij, J.D. and Sandala, M.G.I "The Biologic Action and Hygienic Significance of Electromagnetic Fields of Superhigh and Ultrahigh Frequencies in Densely Populated Areas", Proc. International Symposium, Warsaw, Poland, October 1973, 289-293.
231. Petrov, I.R. and Syngayevskaya, Y. A., "Endocrine Glands", Influence of Microwave Radiation on the Organism of Man and Animals, ed. I.R. Petrov. Leningrad, Meditsina Press, 31, 1970 (NASA TT-F-708)
232. Mikoiajczyk, H. J., "Microwave Irradiation and Endocrine Functions", Proc. International Symp. Warsan,, Poland, 1973, 46-51.
233. Michaelson S. M.; Guillet, R., Lotz, W. G.; Lu, S. T. and Magin, R. L., "Neuroendocrine Responses in the Rat and Dog Exposed to 2450 MHz (CW) Microwaves", HEW Publication (FDA) 77-8026, 263-279, 1977.
234. Milroy, W. C. and Michaelson, S. M., "Thyroid Pathophysiology of Microwave Radiation", Aerospace Med. 43, 1126-1131, 1972.
235. Baranski, S.; Ostrowski, K. and Stodoinik - Baranska W., "Badania czynnosciowe i morfoiologiczne gruczoly tarczycowe u zwierzat napromienlowanych mikrofalami", Acta Physiol. Polon. 23, 997, 1972.

236. Parker, L. W., "Thyroid Suppression and Adrenomodulatory Activation by Low Intensity Microwave Radiation", *Am. J. of Physiology* 224, 1388-1390, 1973.
237. Mikojaiczek, H., "Microwave Induced Shifts of Gonadotropic Activity in anterior Pituitary Gland of Rats", HEW Publication (FDA), 77-8010, 377-383, 1977.
238. Marha, K., "Maximum Admissible Values of VHF and VLF Electromagnetic Radiation at Work Places in Czechoslovakia in Biological Effects and health Implications of Microwave Radiation", *Symposium Proceedings*, ed. S. (Clearly, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 188-196, 1970.
239. de Lorge, J., "Operant Behavior and Colonic Temperature of Squirrel Monkeys during Microwave Irradiation". Presented at 1977 International Symposium on the Biological Effects Of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
240. Merce, D. E. and Wachtel, H., "Microwave Effects on Nerve Vitality". Presented at 1977 International Symposium on the Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
241. Bawin, S. M.; Kaczmarck, L. K. and Adey, W. R., "Effects of Modulated VHF Fields on the Central Nervous System", *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 247, 74-80, 1975.
242. Bawin, S. M.; Cabalas-Medici, R. J. and Adey, W. R., "Effects of Modulated Very High Frequency Fields on Specific Brain Rhythms in Cats", *Brain Research* 58, 365-384, 1973.
243. Bawin, S. M. and Adey, W. R., "Calcium Binding in Cerebral Tissue", HEW Publication (FDA) 77- 8026, 305-313, 1977.
244. Bawin, S. M. and Adey, W. R., "Interactions Between Nervous Tissues and Weak Environmental Electric Fields", HEW Publication (FDA), 77-8010, 323-330, 1977.
245. Adey, W. R., "Introduction: Effects of Electromagnetic Radiation on the Nervous System", *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 247, 15-20, 1975.
246. Wachtel, H.; Seaman, R. and Joines W "Effects of Low - Intensity Microwaves on Isolated Neurons", *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 247, 46-62, 1975.
247. Taylor, E. M. and Ashleman, B. T., "Some Effects of Electromagnetic Radiation on the Brain and Spinal Cord of Cats", *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 247, 63-73, 1975.
248. Frey, A. H., "Brain Stem Evoked Responses Associated with low Intensity Pulsed VHF Energy", *J. Applied Physiol.* 23, 984-988, 1967.
249. Tyazheiov, Y. Y.; Tigranian, R. E. and Khizhniak, E. P., "New Artifact-Free Electrodes for Recording of Biological Potentials in Strong Electromagnetic Fields", *Radio Science* 12 (65), 121-123, 1977.
250. Frey, A. F.; Feid, S. -R. and Frey, B., "Neural Function and Behavior: Defining the Relationship", *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 247, 433-439, 1975.
251. Oscar, K. J. and Hawkins, T. D., "Microwave Alterations of the Blood - Brain Barrier System of Rats", *Brain Research* 126, 281-293, 1977.
252. Albert, E. N., "Light and Electron Microscopic Observations on the Blood – Brain Barrier after Microwave Irradiation", HEW Publication (FDA), 77-8026, 294-304, 1977.
253. Justesen, D. R., "The Central Nervous System and Behavior". IEEE Reprint Volume, 1978

254. Frey, A. H., "Auditory System Response to Radiofrequency Energy", *Aerospace Medicine* 32, 1140- 1142, 1961.
255. Frey, A. H. and Messenger, Jr. R., "Human Perception of Illumination with Pulsed Ultra High Frequency Electromagnetic Energy", *Science* 181, 356-358, 1973.
256. Frey A. fi., "Biological Function as Influenced by Low-Power Modulated Energy", *IEEE Trans. Micro- wave Theory Techniques* 19, 153-164, 1971.
257. Foster, K. R. and Finch, E. D., "Microwave Hearing: Evidence for Thermo -Acoustic Auditory Stimulation by Pulsed Microwaves", *Science* 185, 256-258, 1974
258. Guy, A. W., Chou, C. K., Lin, J. C. and Christensen, D., "Microwave-Induced Acoustic Effects in Mammalian Auditory Systems and Physical Materials", *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 247, 194-218, 1975.
259. Chou, C. K. and Guy, A. W., "Quantitation of Microwave Biological Effects", HEW Publication (FDA) 77-8026, 81-103, 1977.
260. Chou, C. K., Guy, A. W. and Galambos, R., "Characteristics of Cochlear Microphonics", *Radio Science* 12 (65), 221-227, 1977.
261. King, N. W., Justesen, D. R. and Ciarke, R. L., "Behavioral Sensitivity to Microwave Radiation", *Science* 172, 398-401, 1971.
262. Justesen, D. R. and King, N. W., "Behavioral Effects of Low - Level Microwave Irradiation in the Closed Space Situation", in *Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation- Symposium Proceedings*, ed. S. F. Cleary, Washington, D. C., U. S. Govern. Printing Office, 1970.
263. Lin, J. C., Guy, A. W. and Caidwell, L. R., "Thermographic and Behavioral Studies of Rats in the Near Field of 918 MHz Radiation's", *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques*, MIT-25, 833-836, 1977.
264. Frey A.H. and Feid, S.R. "Avoidance by Rats of Illumination with Lower Power nonionizing Electromagnetic Energy", *J. Comp. Physiol. Psychol.* 89, 183-188, 1975.
265. Monahan, J. C. and Ho, H. S., "Microwave Induced Avoidance Behavior in the Mouse", HEW Publication (FDA) 77-8010, 274-283, 1977.
266. Monahan, J. C. and Ho, H. S., "The Effect of Ambient Temperature or the Reduction of Microwave Energy Absorption by Mice", *Radio Science* 12 (65), 257-262, 1977.
267. Monahan, I. C. and Henton, W. W., "Free-Operant Avoidance and Escape from Microwave Radiation", HEW Publication (FDA) 77-8026, 23-33, 1977.
268. D'Andrea, J. A., Gandhi, O. P. and Lords, J. L., "Behavioral and Thermal Effects of Microwave Radiation at Resonant and Non-resonant Wavelengths", *Radio Science* 12 (65), 251-256, 1977.
269. Hunt, E. L., King, N. W. and Philips, R. D., "Behavioral Effects of Pulsed Microwave Radiation", *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 247, 440-453, 1975.
270. Galloway, W. D. "Microwave Dose Response Relationships on Two Behavioral Tasks", *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 247, 410-416, 1975
271. De Lorge, J. O., "The Effects of Microwave Radiation on Behavior and Temperature in Rhesus Monkeys", HEW Publications (FDA) 77-8010, 158-174, 1977.

272. Scholl, D. Nf. and Allen, S. J., "Skilled Performance in RFR Environments". Presented at the 1977 International Symposium on the Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
273. Moe, K. E., et al. "Physiological and Behavioral Effects of Chronic Low - Level Microwave Radiation in Rats", HEW Publications (FDA) 77-8010, 248-255, 1977.
274. Roberti B. Et al "Preliminary Investigations of the Effects of Low -Level Microwave Radiation on Spontaneous Motor Activity in Rats", Annals N. Y. Acad. Sci. 247, 427-424.
275. Thomas, J. R., et al. "Effects of low - level Microwave Radiation on Behavioral Baselines", Annals N. Y. Acad. Sci. 247, 425-432, 1975
276. Glaser, Z. R. and Dodge, C. H., "Biomedical Aspects of Radio Frequency and Microwave Radiation: A Review of Selected Soviet, East European, and Western References", HEW Publication (FDA) 77-8010, 2-34, 1977.
277. Dodge, C. H. and Glaser, Z. H., "Trends in Electromagnetic Radiation Bioeffects Research and Related Occupational Safety Aspects", J. Microwave Power 12, numero 4, 1977.
278. Barron, C. I., Love, A. A., and Baraff, A. A., "Physical Evaluation of Personnel Exposed to Microwave Emanations", J. Aviation Med., 26, 442-459, 1955.
279. Barron, C. 1, and Baraff, A. A., "Medical Considerations of Exposure to Microwaves (Radar)", J.A.M.A., 168, 1194-1199, 1958.
280. Robinette, C. D., and Silverinan, C., "Causes of Death Following Occupational Exposure to Microwave Radiation (Radar) 1950-1974". HEW Publication (FDA), 77-8026, 338-344, 1977.
281. Sadcikova, M.N., "Clinical Manifestations of Reactions to Microwave Irradiation in Various Occupational Groups", in Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation, Proc. Inter. Symp., Warsaw, Poland, pp. 261-267, 1973.
282. Siekierzynski, M., "A study of the Health Status of Microwave Workers", in Biologic Effects and Health Hazards of Microwave, Radiation, Proc. Intern. Symp., Warsaw, Poland, pp. 273-280, 1973.
283. Czerski, P., Siekierzynski, M., and Gidynski, A., "Health Surveillance of Personnel Occupationally Exposed to Microwaves. 1. Theoretical Considerations and Practical Aspects", Aerospace Med. 45, 1137- 1142, 1974.
284. Sickierzynski, M., et al. "Health Surveillance of Personnel Occupationally Exposed to Microwaves. II Functional Disturbances", Aerospace Med. 45, 1143-1148, 1974.
285. Cleary, S. F., and Pastemack, B. S., "Lenticular Changes in Microwave Workers", Arch. Environ. Health 12, 23-29, 1966.
286. Appleton, B., and Mc Crossan, G. C., "Microwave Lens Effects in Humans", Arch. Opthal. 88, 259-262, 1972.
287. Aurcil, E., and Tengroth, B., "Lenticular and Retinal Changes Secondary to Microwave Exposure", Acta Opthal. 51, 764-771, 1973.
288. Zydecki, S., "Assessment of Lens Translucency in Juveniles, Microwave Workers and Age Matched Groups", Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation, Proc. Intern . Symp., Warsaw, Poland, pp. 306-308, 197

289. Odiand, L. T.. "Radio-Frequency Energy a Hazard to Workers?" *Ind. Med. Surg.* 42, 23-26, 1973.
290. Sickierzynski, M., et al. "Health Surveillance of Personnel Occupationally Exposed to Microwaves III Lens Translucency", *Aerospace Med.* 45, 1146-1148, 1974.
291. Shacklett, D. E., Tredici, T. J., and Epstein, D. L., "Evaluation of Possible Microwave-Induced Lens Changes in the United States Air Force", *Aviation, Space and Environ. Medicine*, 1403-1406, November 1975
292. Michaelson, S. M., "Effects of Exposure to Microwaves Problems and Perspectives", *Environ. Health Perspectives* 8, 133-156, 1974.
293. Zaret, M. M., Kaplan, I. T., and Kay, A. M., "Clinical Microwave Cataracts", in *Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation*, Ed. S. F. Cleary, Symp. Proc., Richmond, Virginia, 1969, p. 82.
294. Lancracjan, I., "Conadic Function In Workman with Long -Term Exposure to Microwaves", *Health Physics* 29, 381-385, 1975.
295. McRec, D.I., "Environmental Aspects of Microwave Radiation", *Environ. Health Perspectives*, 41-53, 1972
296. Ranzen-Yevdokimov, I. G., and Sorokin, V. A., "Diagnosis and Treatment of Neuropsychic Disturbances", in "Influence of Microwave Radiation on the Organisms of Man and Animal". Ed. I. R. Petrov, *NASA-Techn. Transf. F 708*, 1972.
297. Silverman, C., "Nervous and Behavioral Effects of Microwave Radiation in Humans", *Am. J. Epidemiology* 97, 219-224, 1973.
298. Rozzeli, T. C., "Thermal or Nonthermal: West versus East", *Proc. Health Physics Symp.*, Puerto Rico, 1973.
299. GOST Standard 12.1.006-76. "Occupational Safety Standards System, Electromagnetic fields of Radiofrequency General Safety Requirements". *Nat. Research Council of Canada, Trans*
300. *Intern. Rad. Prot. Assoe.* "Overview on Nonionizing Radiation", U. S. Dept. HEW Publication, 4-29, April 1977.
301. Repacholi, M. H., "Proposed Exposure Limits for Microwave and Radiofrequency Radiations in Canada", *J. Microwave Power* 13(2), 199-211, 1978.
302. Webb, M. D. et al. "Assessment of the EM Field Coupling of 915 MHz Oven Leakage to Human Subjects by Thermographic Studies on Phantom Models", *J. Microwave Power* 11, 162-164, 1976.
303. Michaelson, S. M. and Suess, M. J., "An International Program for Microwave Exposure Protection", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.* MTT-22, 1301-1302, 1974
304. Marha, K., "Microwave Radiation Safety Standards in Eastern Europe", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.* MIT-19, 165-168, 1971
305. ANSI C 95.1-1974. "Safety Level of Electromagnetic Radiation with Respect to Personnel".
306. "Threshold Limit Values of Physical Factors with Intended Changes Adopted by ACGIH for 1971". *Am. Conf. of Government Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio*, 1971.
307. CSA Standard 265-1966. "Radiation Hazards from Electronic Equipment". September 1966.
308. "Swedish Nonionizing Radiation Standards". *Worker Protection Authority*, 1976.

309. Johnson, C. C. et al. Radio-Frequency Dosimetry Handbook Second Edition, University of Utah, Salt Lake City, Utah, 1978.
310. Stuchly, M. A., Repacholi, M. H. and Lecuyer, D., "The Impact of Regulations on Microwave Ovens in Canada", Health Physics, 1978.
311. Hagmann, M. J., Gandhi, O. P. and Durney, C. H., "Numerical Calculations of Electromagnetic Energy Deposition for a Realistic Model of Man". Presented at Intern. Symp. on Biological Effects of Electromagnetic Waves, Airlie, Virginia, November 1977.
312. Tell, R. A., "An Analysis of Radio-Frequency and Microwave Absorption Data with Consideration of Thermal Safety Standards". EPA Techn. Note, ORP/EAD 73-2, April 1978.
313. "Installation and Safety Procedures for Radio-Frequency and Microwave Devices in the Frequency Range 10 MHz - 300 GHz". Environmental Health Series - Safety Code, Health and Welfare Canada, 1978.
314. Portela, A.; Guardado, M. I.; de Xammar Oro, J. R.; Brennan, M.; Trainotti, Y.; Stewart, P. A.; Pérez, R. J.; Rodríguez, C.; Guerrero, A. and Rozzell, T. C., "Quantitation of Chronic Microwave Radiation Effects on Muscle Cell Osmotic State and its Membrane Perm selectivity" ONS, U.S., Sci. Report NOOOJ4- 76-C-0704, April 15, 1976 (OOOIAA, ACR: AA) Presented at Intern. Symp. on the "Biological Effects of Electromagnetic Waves" Airlie, Virginia, October 30, November 4, 1977.
315. Portela, A.; Guardado, M. I.; Jenerick, H.; Stewart, P. A.; Pérez, R. J.; Rodríguez, C.; de Xamrnar Oro, J. R.; Zothner, E.-, Rozzeli, T. C. and Ginieno, A., "Quantitation of Chronic Microwave Effects on Muscle Cell Bioelectrical Responses: Arrhenius Temperature Dependence Analysis":  
Part I: "Temperature Dependence on the Passive and Dynamic Electrical Parameters of Muscle Cells."  
Part II: "Quantitation of Chronic Microwave Effects on Muscle Cell Electrical Excitable Properties: A Temperature Dependence Analysis of the H-H Cable and Membrane Current Parameters of Irradiated Cell". ONR U. S. Navy Progress Report N° 2 0001 AA, ACA: AA (June 1978). Presented at URSI (Inter- national Union of Radio Sciences); Open Symposium on the "Biological Effects of Electromagnetic Waves", Helsinki, August 1-8, 1978. Acta Physiol. Latinoam. 28, October, 1978@
316. Portela, A. y Skvarca, J. J., Manual para estándares de seguridad: Límites de exposición ocupacional y población en general a campos electromagnéticos (EM) de radio frecuencia, comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz. Dirección Nacional de Calidad Ambiental, Secretaría de Salud, Ministerio de Salud y Acción Social, Centro de Estudios Comparados (CEC), Fuerza Aérea Argentina, Septiembre, 1987.
317. Portela, A. y Skvarca, J. J., Manual provisorio de seguridad. Para la exposición ocupacional de personal de estaciones de radar y telecomunicaciones. Dirección Nacional de Calidad Ambiental, Secretaría de Salud, Ministerio de Salud y Acción Social, Centro de Estudios Comparados (CEC), Fuerza Aérea Argentina, Septiembre, 1987.
318. Portela, A. y Skvarca, J. J., Filosofía del establecimiento de estándares de emisión y estándares de exposición; protección para frecuencias. Dirección Nacional de Calidad Ambiental, Secretaría de Salud, Ministerio de Salud y Acción Social, Centro de Estudios Comparados (CEC), Fuerza Aérea Argentina, Septiembre, 1987.
319. Environmental Health Criteria 35 (Manual): Extremely Low Frequency (ELF) Fields. WHO/IRP Task Group of ELF Fields. Co -Author Adolfo Portela. WHO, Geneva 1984.

320. Portela, A. et al., Interacciones, efectos biológicos y dosimetría, Avances para el establecimiento de estándares de seguridad de RF- Microondas para el ser humano, 1-40. Presentado por el Servicio Naval de Investigación y Desarrollo (SENID), Armada Argentina; J-III Operaciones EMGE; Office of Naval Research (ONR), US Navy Department; e Instituto de Investigaciones Biofísicas (INDEBIO), CONICET; al Primer Congreso Mundial de Ingeniería y Medio Ambiente, Nov. 1981. El estudio fue encomendado por el Ministerio de Salud y Acción Social.
321. Prospección electromagnética. Sistemas de monitores para la determinación de niveles, en la exposición ambiental a RF- Microondas: Portela, A., et al.; Primer Congreso Mundial de Ingeniería y Medio Ambiente, Nov. 1981, 1-42 (estudio encomendado por el Ministerio de Salud y Acción Social).
322. Prospección electromagnética Pacheco, González, S.; Campastro, O. y Portela, A., et al. Informe Tecnológico Ministerio de Salud y Acción Social presentado por INDEBIO, CONICET, 1982.
323. Portela, A., Prospección electromagnética estación terrena Balcarce, Informe tecnológico, de INDEBIO, CONICET a ENTEL - ENCOTEL. Secretaría de Comunicaciones, Ministerio de Obras y Servicios Públicos, año 1981.
324. Criterios de salud ambiental 16: Radiofrecuencias y microondas. Publicado por Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud, Publicación Científica N° 468, WASH DC. 1-120.
325. NCRP Report N° 6; Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields. Issued, April 2, 1986. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, MD 20814, USA.
326. Grandolfo, M., Michaelson, S. M. (eds). Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation: Static and ELF EM Fields, New York, Plenum Press, 1985.
327. Frieden, E. and Lipner, H., Biochemical Endocrinology of Vertebrates -Foundations of Modern Biochemistry Series, Prentice-Hall, 1978.
328. Control of Energy Exchange. Carson, L. D. and Hsieh, A. C.; McMillan, London, 1980. 329. Stuchly, M. et al. Health Aspects of RF and Microwave Radiation Exposure. Pws 1 and 11 (1977), 77- EHD- 13 -, published by Authority of the Minister of National Health and Welfare of Canada