

Gestión ambiental de la radiación de microondas de radares meteorológicos en Cuba. Efectos en la salud

Environmental management of microwave radiated by weather radars. Its effects in Human Health.

Lic. María Marlen Gutiérrez Gutiérrez | marlen.gutierrez@insmet.cu | Sede del Instituto de Meteorología de Cuba

Dr. Jorge Luis Santana Romero | jluisst37@gmail.com | Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas

Dr. Orlando Lázaro Rodríguez González | orlando.rodriguez@insmet.cu | Centro de Radares, Instituto de Meteorología de Cuba

M.Sc. Leonardo Lino Fernández Suárez | leonardo@cmw.insmet.cu | Centro de Radares, Instituto de Meteorología de Cuba

Ing. Yoanni Sarmiento Arias | sarmiento@cmw.insmet.cu | Centro de Radares, Instituto de Meteorología de Cuba

Ing. Redner Licea Vera | redner@cmw.insmet.cu | Centro de Radares, Instituto de Meteorología de Cuba

Recibido: 13 de noviembre, 2013; aceptado: 29 de noviembre, 2013. pp. 169 – 187. pp. 169 – 187.

Resumen

El Instituto de Meteorología de Cuba cuenta con una red de ocho radares meteorológicos para la vigilancia de fenómenos de interés meteorológico en el país y los mares adyacentes. Estos radares emiten microondas al medio ambiente, y junto con otros dispositivos muy utilizados en tareas cotidianas (por ejemplo, teléfonos, hornos y equipos industriales) generan al entorno un nivel de radiación adicional al nivel de fondo natural. Esto constituye un fenómeno relativamente reciente como objeto de estudio de la interacción de la radiación con la materia, el medio ambiente y, en específico, con el hombre. Cinco de estos radares se encuentran en lugares remotos de acceso difícil, pero tres de estos funcionan en ambientes urbanos, en especial, los de Camagüey y Casablanca, que se encuentran en entornos densamente poblados.

En el presente trabajo se muestra un análisis bibliográfico acerca de los efectos de las microondas sobre el medio ambiente, en particular sobre la salud humana. Sobre la base de estudios epidemiológicos, se evidencia que la exposición a diferentes niveles de radiación genera efectos nocivos para la salud, ta-

les como: genotóxicos, cancerígenos, reproductivos, auditivos, neurosicológicos, hematológicos, inmunológicos y cardiovasculares, entre otros.

El objetivo del presente estudio es identificar los probables riesgos a la salud humana que se presentan a partir de una exposición a las microondas y, en consecuencia, reconocer la necesidad de una gestión ambiental adecuada de la exposición a estas en el entorno de radares meteorológicos de Cuba.

PALABRAS CLAVE: Gestión ambiental, microondas, radar meteorológico, salud, Cuba.

Abstract

The Cuban Institute of Meteorology operates a network of eight meteorological radars for weather surveillance in Cuban territory and adjacent seas. Those radars operate in the microwave region, so, together with a number of devices used in everyday life, industry and communication, they contribute to generate an additional radiation level over the natural one. This is a relatively new subject of study in the interaction between radiation and the matter, the environment and more specifically the human being.

Five of those radars are placed in remote locations, but three of them operate in urban conditions, especially those in Camagüey and Casablanca, which are placed in crowded locations.

In the current paper we show an analysis of bibliography regarding microwave effects on environment and more specifically on human health. It is apparent through epidemiological studies, that exposure to different levels of radiation generates harmful effects like: genotoxic, carcinogenic, reproductive, aural, neuropsychic, hematologic, immunologic and cardiovascular, among others.

The objective of the present work is to identify probable risk to human health in exposing to microwaves and consequently recognize the needs of correct environmental management of microwave exposition in the vicinity of weather radars in Cuba.

KEYWORDS: Environmental management, microwave, radar, health, Cuba.

Introducción

El Sistema Meteorológico Nacional cuenta con diversos medios para efectuar una vigilancia activa del tiempo y el clima en el archipiélago cubano, entre los cuales se destaca la Red de Radares del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), por su importancia para la detección, el seguimiento y el alerta de las tormentas tropicales.

La referida red está compuesta por ocho radares que brindan una cobertura excelente al territorio nacional y las aguas adyacentes (Rodríguez *et al.*, 2006). Algunos de estos radares están ubicados en puntos de acceso difícil de la geografía cubana, por ejemplo: La Bajada, en la Península de Guanahacabibes, en Pinar del Río; Punta del Este, en la Isla de la Juventud; Pico San Juan, en la cima del Escambray cienfueguero; y Gran Piedra, en la elevación homónima cerca de la ciudad de Santiago de Cuba, pero a una altura considerable. Sin embargo, tres de los radares meteorológicos

cubanos se encuentran ubicados en entornos urbanos, tales como: Casablanca, en la Loma del mismo nombre en La Habana; Holguín, en la Loma El Paraíso, cerca de la ciudad capital de esta provincia; y Camagüey, en las cercanías del Aeropuerto Ignacio Agramonte de esta ciudad.

Los radares meteorológicos operan en la gama de las microondas y, por tanto, emiten al medio ambiente radiaciones no-ionizantes; la cuantía o la intensidad de emisión de estas radiaciones está en dependencia de numerosos parámetros, propios de cada radar, y las especificidades de su ubicación con respecto al entorno (Rodríguez, 2006).

Desde bien temprano se demostró que, en determinado grado, las microondas son nocivas para el organismo humano (Barron y Baraff, 1958), por lo que existen al respecto abundantes estudios a nivel internacional (que serán analizados en detalle más adelante), de los cuales se han derivado diferentes recomendaciones internacionales y diversos países han emitido normativas que regulan la radiación de microondas por debajo de niveles considerados como ambientalmente seguros.

El efecto sobre la salud física representa el daño que un peligro ambiental puede ocasionar a una persona (individual); a menudo, el mismo peligro puede ocasionar una gama de efectos de severidad diferente. La radiación se encuentra entre los factores más comunes de peligros físicos, y está conceptuada como uno de los diferentes tipos de peligros para la salud ambiental, puesto que puede ocasionar efectos indeseables o perjudiciales bajo determinadas situaciones de exposición (Yassi *et al.*, 2002).

Los radares meteorológicos son de vital importancia para el Sistema Meteorológico Nacional, pero, a su vez, generan una contaminación electromagnética que puede resultar nociva. Por tal motivo, es evidente la necesidad de emprender acciones investigativas para diseñar un procedimiento metodológico que permita gestionar ambientalmente la operación de los radares

meteorológicos y que minimice a niveles seguros la contaminación electromagnética que estos generan.

Como parte de las acciones de investigación, en este trabajo se presenta un análisis de la bibliografía publicada por diferentes expertos en cuanto a los efectos de las microondas, que son empleadas en los radares de vigilancia meteorológica, sobre la salud humana.

Método

La operación de los radares meteorológicos es una acción con impactos *positivos* sobre el medio ambiente, en particular, sobre los componentes salud y economía, al coadyuvar a salvaguardar las vidas humanas y poner a salvo los bienes de la economía nacional. Asimismo, tiene un impacto positivo sobre el componente social, por la sensación de bienestar que genera el saberse protegidas (las personas, la sociedad) contra los fenómenos meteorológicos peligrosos que detectan estos radares. Es un hecho habitual para los cubanos seguir la trayectoria de los huracanes que se aproximan al país gracias a las informaciones televisadas por los pronosticadores del Instituto de Meteorología, donde se exponen abundantes imágenes de los radares. Vale destacar que estas informaciones de radar también adquieren cierta connotación para ciudadanos e instituciones de países vecinos (Rodríguez *et al.*, 2012).

Sin embargo, la actividad de los radares meteorológicos, igualmente, provoca impactos *negativos* sobre los mencionados componentes del medio ambiente por los motivos siguientes: a) en la salud, dada la contaminación electromagnética que generan al emitir microondas; b) en la economía, por la energía eléctrica que consumen y el gasto en piezas de repuesto e insumos, y c) en el componente social, dada la preocupación que causa a la población aledaña a un radar, al imaginarse que pueden ser afectados por sus radiaciones electromagnéticas.

En relación con este último punto, se han presentado numerosos estudios sobre las posibles afectaciones de las radiaciones electromagnéticas al medio ambiente, en específico, a la salud humana. En el presente estudio se facilita un resumen del análisis bibliográfico realizado, sobre lo que se ha avanzado en cuanto a los efectos de las microondas, empleadas en los radares de vigilancia meteorológica, sobre la salud humana.

A tales efectos, se revisaron las publicaciones siguientes: *Occupational Safety and Health Series*, de la Organización Internacional del Trabajo; *Health Physics*, del Comité Internacional para la Radiación No-Ionizante; *American Journal of Epidemiology*; *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *Radio Science*; *Science*; *Bulletin of the World Health Organization*; *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique*; *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *Archive of Environmental Health*; *New England Journal of Medicine*; *Reports of USA National Council on Radiation Protection and Measurement*; *Reports of UK National Radiological Protection Board*; *Revista Cubana de Medicina Militar*, y algunos sitios de internet que brindan información específica sobre el tema.

Discusión

Generalidades

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas; referido a un objeto, el espectro electromagnético o, simplemente, espectro es la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1988).

A los efectos de las radiaciones y su acción sobre las personas, el espectro electromagnético puede dividirse (National Radiological Protection Board, 1991) de la manera siguiente (Tabla 1): *radiaciones ionizantes* (rayos cósmicos, rayos gamma, rayos X) y *radiaciones no-ionizantes* (ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, ondas largas de radio). Las primeras, son ondas electromagnéticas de frecuencia muy alta que contienen una energía suficiente para romper enlaces químicos a nivel molecular en las células; las segundas, aunque su energía es menor poseen efectos biológicos sobre los tejidos y células, tales como el calentamiento y la inducción de corrientes eléctricas. Por tanto, las ondas electromagnéticas, en general, encierran el peligro de efectos biológicos que pueden traer consigo consecuencias adversas para la salud (Guerrero y Pérez, 2006; González, 1978).

TABLA 1
Divisiones del espectro electromagnético (tomado de Skolnik, 2008)

Banda	Longitud de onda	Frecuencia	Energía (J)
Rayos gamma	< 10 pm	> 30,0 EHz	> 20:10-15
Rayos X	< 10 nm	> 30,0 PHz	> 20:10-18
Ultravioleta extremo	< 200 nm	> 1,5 PHz	> 993:10-21
Ultravioleta cercano	< 380 nm	> 789 THz	> 523:10-21
Luz visible	< 780 nm	> 384 THz	> 255:10-21
Infrarrojo cercano	< 2,5 µm	> 120 THz	> 79:10-21
Infrarrojo medio	< 50 µm	> 6,00 THz	> 4:10-21
Infrarrojo lejano/submilimétrico	< 1 mm	> 300 GHz	> 200:10-24
Microondas	< 30 cm	> 1 GHz	> 2:10-24
Ultra alta frecuencia-radio	< 1 m	> 300 MHz	> 19.8:10-26
Muy alta frecuencia-radio	< 10 m	> 30 MHz	> 19.8:10-28
Onda corta-radio	< 180 m	> 1,7 MHz	> 11.22:10-28
Onda media-radio	< 650 m	> 650 kHz	> 42.9:10-29
Onda larga-radio	< 10 km	> 30 kHz	> 19.8:10-30
Muy baja frecuencia-radio	> 10 km	< 30 kHz	< 19.8:10-30

Hoy día, las fuentes de campos de radiofrecuencias son innumerables y muy variadas en el entorno

en que se desempeñan los humanos. Entre las que actúan específicamente en el rango de microondas pueden mencionarse las siguientes: las radiaciones solares (de origen natural) y las de origen artificial (hornos de microondas, termoselladores, dispositivos de enlace por satélite, sistemas de comunicaciones por microondas, y radares de diversos tipos).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) subdivide las radiaciones no-ionizantes en las siguientes (Alonso, García y Onaindia, 2011):

1. Campos electromagnéticos estáticos, no variables en el tiempo: Están presentes en los trenes de levitación magnética, sistemas de resonancia magnética para el diagnóstico médico y los sistemas electrónicos en aplicación industrial experimental.
2. Campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (FEB o ELF), hasta 300 Hz: Están presentes en los equipos relacionados con la generación, el transporte o la utilización de la energía eléctrica de 50 Hz (frecuencia industrial), líneas de alta y media tensión, y los aparatos electrodomésticos (neveras, secadores de pelo, etc.).
3. Campos de frecuencia intermedia (FI), con frecuencias de 300 Hz a 10 MHz: los que están en las pantallas de ordenador, los dispositivos antirrobo y los sistemas de seguridad.
4. Campos de radiofrecuencia (RF), con frecuencias de 10 MHz a 300 GHz: Son las ondas de radio y televisión, los teléfonos móviles e inalámbricos, los dispositivos Wi-Fi, *bluetooth*, los hornos de microondas, las antenas de telefonía móvil y los radares.

El radar (Atlas, 1990) es un sistema que utiliza ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor; a partir de este “eco” puede extraerse gran cantidad de in-

formación. En la meteorología, por ejemplo, el radar se emplea para: a) localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar sus tipos; b) extraer la estructura de las tormentas y su potencial de trayectoria y de daño; y c) estimar la dirección y la velocidad del viento en las zonas bajas de la atmósfera.

Las microondas, según la definición de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1992), abarcan el rango de frecuencias desde 1 GHz hasta 300 GHz. Las frecuencias que se encuentran dentro de la gama de las microondas, a su vez, se han subdividido en bandas de diferentes denominaciones, entre las cuales pueden citarse las más empleadas en los radares: banda L (1 GHz–2 GHz), la denominación proviene de la palabra *long*; banda S (2 GHz–4 GHz), la denominación proviene de *short*; banda C (4 GHz–8 GHz), la denominación proviene de *compromise*; banda X (8 GHz–10 GHz), la denominación atañe a que estos radares se empleaban para el guiado de artillería, y la “X” se tomaba a semejanza de la cruz de la mira de puntería de un cañón; banda Ku (12 GHz–18 GHz), la denominación proviene de las palabras alemanas *kurz unten* (debajo de la corta); banda K (18 GHz–26 GHz), la denominación proviene de la palabra alemana *kurz* (corta), y banda Ka (26 GHz–40 GHz), la denominación proviene de las palabras alemanas *kurz above* (encima de la corta).

En particular, los radares de vigilancia meteorológica trabajan en las bandas S, C y X de la gama de las microondas (Rinehart, 2007). En Cuba, los ocho radares meteorológicos trabajan en la banda S. Los radares MRL-5, con excepción del de Pílon, al cual se le quitó, pueden trabajar, adicionalmente, en la banda X, aunque esta opción se ha utilizado solo para estudios especiales y no para el trabajo operativo (Rodríguez, 2006).

Las microondas, que van desde 1 GHz hasta 300 GHz, ejercen sobre el cuerpo humano una acción diferente, según sea la frecuencia en que se emite. En este rango de frecuencias, a su vez, pueden diferen-

ciarse otros dos rangos bien definidos: de 1 GHz a 10 GHz y de 10 GHz a 300 GHz.

En el primer rango (1 GHz a 10 GHz), las microondas penetran en los tejidos interiores e interactúan con las moléculas de agua produciendo calor por absorción. La profundidad de penetración en el tejido depende de la frecuencia de la microonda incidente y crece conforme decrece la frecuencia de la radiación. La absorción de energía de los campos de microondas por parte de los tejidos se mide según la *tasa específica de absorción* (SAR: Specific Absorption Rate) en una masa de tejido dada (Dimbylow, 1997; Dimbylow y Mann, 1994). La unidad empleada para esta tasa es el *watt por kilogramo de masa* (W/kg).

En el segundo rango (10 GHz a 300 GHz), las radiaciones de microondas son absorbidas por la superficie de la piel y muy poca energía llega a los tejidos interiores (Frey y Messenger, 1973). La exposición a estos campos de microondas por encima de 10 GHz se mide, fundamentalmente, como *densidad de potencia*, expresado en *watt por metro cuadrado* (W/m²). Para que a estas frecuencias tan elevadas dentro de la radiofrecuencia se produzcan efectos perjudiciales a la salud (cataratas en el ojo o quemaduras cutáneas), se requieren densidades de potencia superiores a 1 000 W/m². Estas densidades de potencia tan elevadas no existen en el entorno propio de la vida diaria, sino que se suelen dar, por ejemplo, en las proximidades de radares muy potentes —los radares meteorológicos no lo son—, en cuyo entorno está prohibida la presencia humana (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998).

Ferrer (1989) plantea que en las cercanías de fuentes de microondas y radiofrecuencias con mayores longitudes de onda, los valores de la intensidad de campo eléctrico (en V/m) y la intensidad de campo magnético (en A/m) proporcionan una descripción más apropiada de la radiación. La mayor parte de la energía de estas ondas electromagnéticas se convierte en calor. Sin embargo, no todos los efectos se

explican por la absorción de energía y su conversión en calor; se ha comprobado de forma teórica y con experimentos que existen interacciones a nivel microscópico que causan alteraciones en los sistemas biológicos macromoleculares.

La afectación que tienen las radiaciones electromagnéticas sobre la salud humana constituye un aspecto controvertido en el campo de la ciencia dado que las radiaciones electromagnéticas en función de su frecuencia se clasifican en las que pueden (o no) tener efectos biológicos y(o) las que pueden (o no) tener efectos adversos sobre el hombre. El *efecto biológico* ocurre cuando la exposición produce un cambio fisiológico detectable en un sistema biológico; el *efecto adverso* para la salud ocurre cuando el efecto biológico sobrepasa el límite normal de variabilidad fisiológica del organismo y presenta cierta dificultad de adaptación con detrimento del estado de salud (Castellanos, 2002).

A escala mundial, existe una preocupación de los científicos expertos en campos electromagnéticos (Michaelson, 1983) que está fundada en las radiaciones no-ionizantes y los efectos vinculados con los campos electromagnéticos de radiofrecuencias y microondas. La preocupación se centra en los efectos siguientes: las transformaciones celulares, cromosómicas y genéticas; los efectos sobre el sistema hematopoyético; los cambios en el ritmo cardíaco y la tensión arterial; las alteraciones endocrinas y neuroendocrinas; los efectos sobre la audición; las variaciones en el comportamiento y las alteraciones electroencefalográficas, entre otras.

Los sucesivos epígrafes proporcionan un bosquejo general de la literatura existente sobre los efectos ocasionados por los campos electromagnéticos con frecuencias de microondas. Para un análisis más detallado, no solo en el rango de microondas que concierne a este trabajo, sino en todo el espectro electromagnético, se recomienda el estudio de las referencias siguientes: National Radiological Protec-

tion Board, 1991; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Mundial de la Salud/Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación, 1993; McKinlay *et al.*, 1996; Polk y Postow, 1996; Repacholi, 1998, entre otras.

Efectos de las radiaciones no-ionizantes sobre la salud humana

Efectos térmicos de las microondas

Hasta hace algunos años, han resultado dominantes los estudios con respecto a las consecuencias de los efectos térmicos en los seres vivos; la utilización de este punto de vista en la regulación correspondiente a la radiación electromagnética no-ionizante se conoce como *criterio térmico* (OIT, 1997).

American Conference of Government Industrial Hygienists (1996) y Pavlov (1980) refieren que el hecho de aumentar la temperatura del cuerpo humano entre 1 °C y 2 °C puede tener efectos negativos para la salud, por ejemplo, el agotamiento térmico y el choque térmico. Los estudios sobre trabajadores que laboran en ambientes de estrés térmico han demostrado un empeoramiento del desempeño de tareas sencillas en la medida que aumenta la temperatura corporal hasta un nivel que se acerca al del estrés térmico fisiológico (Ramsey y Kwon, 1988).

Castellanos (2002) refiere que las oscilaciones electromagnéticas se propagan en el espacio en línea recta y que al incidir sobre los cuerpos pueden penetrarlos, reflejarse o absorberse. En dependencia de estos tres factores se produce su efecto sobre los organismos vivos; para una penetración y una absorción de energía mayores, entonces, su acción biológica será mayor. Se plantea que los efectos de las radiaciones no-ionizantes son de tres tipos: térmicos, no térmicos o atérmicos.

Del Busto y Díaz (1987) plantean que los efectos *térmicos* se producen cuando la energía electromagnética causa un aumento medible en la tempera-

tura del objeto o persona (más de 1°C). Estos suceden con intensidades de campo relativamente altas, y el resultado es similar al generado por un golpe de calor: incluyen un aumento de la tensión sanguínea, el vértigo, el cansancio, la desorientación, la cefalea, las náuseas y, en casos extremos (con intensidades de potencia mayores que 1000W/m²), las cataratas, las quemaduras y la esterilidad. Por su parte, los efectos *no térmicos* o *atérmicos* son aquellos que no se acompañan de un aumento de la temperatura. Se discute si serían causados, en caso de existir, por un mecanismo desconocido hasta el presente o si se trata, en última instancia, de una absorción de calor. Sucederían con intensidades de campo menores, aplicadas durante un plazo largo; entre estos, se incluyen los siguientes: el cáncer, las enfermedades inmunes, los cambios genéticos, las arritmias cardíacas y los daños neurológicos.

Cuando las moléculas de agua se someten a la acción de un campo electromagnético cuya frecuencia está en el rango de las microondas, en ellas se inducen momentos oscilantes eléctricos y magnéticos (dipolos, cuadripolos, octupolos, etc.). Estas oscilaciones ocasionan que una parte de la energía incidente se convierta en calor y otra parte sea reirradiada (Abshaev y Rozemberg, 1969). La física de estos procesos de interacción entre la microonda incidente y las moléculas de agua se describe en los trabajos de Abshaev *et al.* (1980); Aden y Kerker (1951); Kerker (1969); Mie (1908), entre otros.

El calor liberado por las moléculas de agua irradiadas con microondas produce un aumento de la temperatura del cuerpo humano. La interacción de la microonda con el calentamiento del cuerpo humano puede encontrarse en los trabajos de Adair, Adams y Akel (1984); Adair y Adams (1980); Hoque y Gandhi (1988); Chen y Gandhi (1988); Guy *et al.* (1975); Institute of Electrical and Electronic Engineers (1992); Jokela, Puranen, y Gandhi (1994); Michaelson (1983); National Council on Radiation Protection (1993);

Ramsey y Kwon (1988); Repacholi (1998); Robinette, Silverman y Jablon (1980); Stern *et al.* (1979); Tenforde (1991) y Tenforde (1992).

Para que se produzcan efectos adversos a la salud en personas expuestas a radiaciones de microondas, los valores del SAR deben ser superiores a 4 W/kg (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998); estos niveles de energía pueden encontrarse solamente a decenas de metros de potentes antenas transmisoras de frecuencia modulada ubicadas en torres altas, y esas áreas son inaccesibles. La mayor parte de los efectos perjudiciales para la salud que pueden producirse por la exposición a campos de microondas se asocian con el calentamiento inducido, cuyo resultado es el aumento de la temperatura (superior a 1°C) de un tejido o del propio cuerpo. El calentamiento inducido en los tejidos corporales puede provocar respuestas no solo fisiológicas, sino también termorregulatorias, incluyendo una menor capacidad para realizar tareas, tanto físicas, como mentales a causa del aumento de la temperatura corporal. Se han observado efectos similares en personas sometidas a estrés calorífico, como las que trabajan en ambientes muy calurosos o que padecen estados febriles prolongados (National Council on Radiation Protection, 1993).

La profundidad de penetración de la microonda en el tejido humano crece conforme disminuye la frecuencia de la microonda incidente. Esta profundidad de penetración depende, asimismo, de las propiedades del tejido (National Radiological Protection Board, 1991): a) depende de la *composición dieléctrica* del tejido dado, por ejemplo, los huesos, con menor contenido en agua, absorben menor parte de la energía que los músculos (Pavlov, 1980); b) depende del *tamaño* del tejido en relación con la longitud de onda de la radiación a la que es expuesto (Michaelson, 1983); y c) depende de la *forma*, la *geometría* y la *orientación* del tejido con respecto a la radiación (National Radiological Protection Board, 1991).

De 100 kHz a 10 MHz. El estudio de Chatterjee, Wu y Gandhi (1986) demostró que, a medida que aumenta la frecuencia desde aproximadamente 100 kHz a 10 MHz, el efecto dominante de la exposición a un campo electromagnético de alta intensidad cambia de la estimulación nerviosa y muscular al calentamiento. A 100 kHz, la sensación principal era un cosquilleo nervioso, mientras que a 10 MHz es de calor en la piel. En este rango de frecuencias, por tanto, los criterios básicos de protección de la salud deben evitar la estimulación de tejidos excitables y los efectos de calentamiento.

De 10 MHz a 300 GHz. Para los campos electromagnéticos con frecuencias desde 10 MHz hasta 300 GHz, el calentamiento es el mayor efecto demostrado de la absorción de energía electromagnética; sin embargo, no hay estudios epidemiológicos que demuestren que pueda lograrse un aumento entre 1°C y 2°C de temperatura en el cuerpo humano, a no ser en las cercanías de radares muy potentes o antenas transmisoras de televisión a muy alta potencia (Tofani *et al.*, 1995).

Otros científicos (Chatterjee, Wu y Gandhi, 1986; Chen y Gandhi, 1988; Hoque y Gandhi, 1988) han investigado sobre la corriente que se induce en un miembro irradiado por microondas. Personas que se han sometido voluntariamente a que se les induzca por medio de un campo de microondas una corriente de 100 mA a 200 mA en una extremidad, refieren una sensación de calor en el miembro; no obstante, el valor SAR resultante no ha producido, en ningún caso, un aumento localizado de temperatura mayor a 1°C en los miembros, lo cual ha sido sugerido como el límite superior de aumento en temperatura sin efectos dañinos para la salud (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Mundial de la Salud/Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación, 1993). Los datos reportados en estudios con voluntarios efectuados por Gandhi *et al.* (1986) con frecuencias de hasta 50 MHz y por Tofani *et al.* (1995) con frecuen-

cias de hasta 110 MHz (el límite superior de la banda de transmisión FM), apoyan un nivel referencial de corriente en los miembros de 100 mA para evitar efectos excesivos de calentamiento (Dimbylow, 1997; Dymbilow y Mann, 1994).

Han existido varios estudios de respuestas de regulación térmica en voluntarios en descanso expuestos a campos electromagnéticos en sistemas de imágenes por resonancia magnética (Shellock y Cruess, 1987; Magin, Liburdin y Persson, 1992). En general, estos estudios demostraron que una exposición de hasta 30 min bajo condiciones donde el SAR de cuerpo entero era inferior a 4 W/kg ocasionó un aumento menor de 1°C en la temperatura profunda del cuerpo.

Las respuestas de sensibilidad y regulación térmicas están asociadas, tanto con el hipotálamo, como con los receptores térmicos ubicados en la piel y en las partes internas del cuerpo. Las señales aferentes que reflejan un cambio de temperatura convergen en el sistema nervioso central y modifican la actividad de los principales sistemas de control neuroendocrinos, disparando las respuestas fisiológicas y de comportamiento necesarias para el mantenimiento de la homeostasis. (Laurens, 1982)

La exposición de animales de laboratorio a campos electromagnéticos que producen absorción en exceso de aproximadamente 4 W/kg ha revelado una configuración característica de respuestas de regulación térmica, en las cuales la temperatura corporal aumenta inicialmente y luego se estabiliza tras la activación de los mecanismos de regulación térmica (Michaelson, 1983). La fase temprana de esta respuesta se acompaña por un aumento en el volumen de la sangre dado el movimiento del fluido del espacio extracelular en la circulación y por aumentos en el ritmo cardíaco y la presión sanguínea intraventricular. Estos cambios cardiodinámicos reflejan las respuestas de regulación térmica que facilitan la conducción del calor hacia la superficie del cuerpo. La exposición prolongada de animales a niveles de radiación por

microondas que aumentan la temperatura corporal, finalmente, resulta en la falla de estos mecanismos de regulación térmica.

Varios estudios con roedores y monos han demostrado, además, un componente de comportamiento en las respuestas de regulación térmica. Se ha observado una disminución en el desempeño de tareas en ratas y monos a valores SAR en el rango de 1 W/kg a 3 W/kg (Stern *et al.*, 1979; Adair y Adams, 1980; De Jorge y Ezell, 1980; D'Andrea *et al.*, 1986). En los monos, comienza el comportamiento alterado de regulación térmica cuando la temperatura en la región hipotalámica exhibe un aumento de valor tan pequeño como de 0,2 °C a 0,3 °C (Adair, Adams y Akel, 1984). El hipotálamo se considera el centro de control para los procesos normales de regulación térmica, y su actividad puede modificarse mediante un incremento pequeño en la temperatura local bajo condiciones en las cuales permanece constante la temperatura del recto.

Un gran número de efectos fisiológicos han sido caracterizados en estudios con sistemas celulares y animales sometidos a niveles de energía electromagnética que ocasionen un aumento de la temperatura corporal en más de 1 °C a 2 °C, (Michaelson y Elson, 1996; D'Andrea *et al.*, 1986). Estos efectos incluyen alteraciones en las funciones neurales y neuromusculares, y una permeabilidad mayor de la barrera sangre-cerebro e impedimento ocular (opacidad del lente y anormalidad de la córnea). Bajo condiciones de exposición parcial del cuerpo a campos electromagnéticos intensos, pueden ocurrir daños térmicos significativos en algunos tejidos sensibles, como el ojo y los testículos.

En experimentos con animales, la exposición a microondas que provocaron valores SAR desde 100 W/kg a 140 W/kg, durante 2 h a 3 h de exposición, ha causado cataratas en los ojos de los conejos al producirse temperaturas lenticulares entre 41 °C y 43 °C (Guy *et al.*, 1975). No se observaron cataratas en monos expuestos a campos de microondas de intensidad

similares o mayores tal vez dada la configuración distinta de absorción energética entre los ojos de los monos y los de los conejos.

A frecuencias muy elevadas (10 GHz-300 GHz), la absorción de energía electromagnética se confina, principalmente, a las capas epidérmicas de la piel, tejidos subcutáneos y la parte exterior del ojo. En el extremo más alto del rango de frecuencias, la absorción es cada vez más superficial; entonces, puede evitarse el daño ocular a estas frecuencias si la densidad de potencia de las microondas es menor que 50 W/m² (Sliney y Wolbarsht, 1980; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Mundial de la Salud/Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación, 1993).

Efectos genotóxicos y cancerígenos de las microondas

Recientemente, han cobrado un interés considerable los posibles efectos cancerígenos de la exposición a los campos de microondas con frecuencias en el rango de los sistemas de comunicaciones de amplia utilización, incluyendo los teléfonos móviles manuales y transmisores de base. Los resultados de las investigaciones en esta área han sido resumidos por la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1996). Existen muchos informes que sugieren que los campos de microondas no son mutagénicos, por lo cual es poco probable que la exposición a estos campos inicie la carcinogénesis (National Radiological Protection Board, 1992; Cridland, 1993; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Mundial de la Salud/Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación, 1993; National Radiation Protection Board, 2001). En cambio, algunos informes recientes sugieren que la exposición de roedores a los campos de microondas a niveles SAR del orden de 1 W/kg puede romper las cadenas de ADN en los testículos y tejidos cerebrales (Sarkar, Ali y Behari, 1994; Lai y Singh 1995, 1996),

aunque, tanto la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1996), como Williams (1996) señalaron deficiencias metodológicas que podrían haber influenciado en modo significativo estos resultados.

Ciertos estudios poblacionales y epidemiológicos correlacionan significativamente la radiación electromagnética no-ionizante con daños a la salud humana. Por ejemplo Eger *et al.* (2004) señalan que la probabilidad de cáncer aumenta en tres veces en la población que vive dentro de un radio de 400 m de una antena de telefonía móvil, en comparación con la población que vive por fuera de ese radio.

Son pocos los estudios sobre el riesgo de cáncer y la exposición a las microondas, y, por lo general, falta una evaluación cuantitativa de la exposición. Dos estudios epidemiológicos de trabajadores con radares en la industria de la aviación y en las fuerzas armadas de los Estados Unidos, no hallaron evidencia alguna de mayor morbilidad o mortalidad por ninguna causa (Barron y Baraff, 1958; Robinette, Silverman y Jablon, 1980; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Mundial de la Salud/Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación, 1993). Otros resultados similares se obtuvieron por Lillienfeld *et al.* (1978) en un estudio con los empleados de la embajada estadounidense en Moscú, quienes fueron sometidos a la exposición crónica a una radiación de bajo nivel por microondas. Selvin, Schulman y Merrill (1992) no reportaron ningún aumento en el riesgo de cáncer entre niños con una exposición crónica a la radiación proveniente de un gran transmisor de microondas cerca de sus hogares. Algunos estudios más recientes no han podido demostrar aumentos significativos en los tumores de tejido nervioso entre los trabajadores y el personal militar expuestos a campos de microondas (Beall *et al.*, 1996; Grayson, 1996). Además, no apareció ningún exceso en la mortalidad total entre los usuarios de teléfonos móviles (Rothman *et al.*, 1996a, b), pero

aún es temprano para observar un efecto sobre la incidencia de cáncer o su mortalidad.

Existió un informe de mayor riesgo de cáncer entre el personal militar (Szmigielski *et al.*, 1988), pero es difícil interpretar los resultados del estudio por no haberse declarado claramente el tamaño de la población ni los niveles de exposición. En un estudio posterior, Szmigielski (1996) encontró mayores tasas de leucemia y linfomas entre el personal militar expuesto a los campos electromagnéticos, pero no estuvo bien definida la evaluación de la exposición a estos. Unos pocos estudios de poblaciones que viven cerca de los transmisores de microondas han sugerido un aumento local en la incidencia de leucemia (Hocking *et al.*, 1996; Dolk *et al.*, 1997a, b), pero los resultados no son concluyentes. En general, los resultados del número reducido de estudios epidemiológicos en humanos proporcionan, únicamente, información muy limitada sobre el riesgo de cáncer.

En un estudio epidemiológico significativo realizado con ratas expuestas a las microondas durante 25 meses, se notó un exceso de malignidades primarias en las ratas expuestas con respecto al grupo de control no expuesto (Chou *et al.*, 1992). Sin embargo, no hubo diferencia en la incidencia de los tumores benignos entre los grupos, y ningún tumor determinado era más prevalente en el grupo expuesto que en ratas comerciales de la misma cepa mantenidas bajo condiciones similares, libres de patógenos específicos. En su totalidad, los resultados de este estudio no pueden interpretarse como indicativos de un efecto de iniciación de tumores con respecto a los campos de microondas.

Varios estudios han examinado los efectos de la exposición a las microondas en el desarrollo de células tumorosas preiniciadas. Szmigielski *et al.* (1982) observaron un aumento en el ritmo de crecimiento en las células de sarcoma pulmonar trasplantadas en ratas expuestas a microondas a mayores densidades de potencia. Es posible que esto sea el resultado de

un debilitamiento de la defensa inmunológica en el huésped como una respuesta al estrés térmico proveniente de la exposición a las microondas. Otros estudios recientes, con niveles atérmicos de irradiación de microondas, no han hallado efectos sobre el desarrollo de melanomas en ratones ni de gliomas cerebrales en ratas (Santini *et al.*, 1988; Salford, Brun y Eberhardt, 1993).

La observación de Balcer-Kubiczek y Harrison (1991) resulta de pertinencia particular para los posibles efectos cancerígenos de los campos pulsados, sobre todo en el sentido de que la transformación neoplástica fue acelerada en células C3H/10T1/2 expuestas a microondas de 2,450 MHz que habían sido moduladas por pulsos de 120 Hz. El efecto dependió de la fuerza del campo, pero se produjo únicamente cuando un promotor químico de tumores (TPA) se encontraba presente en el medio del cultivo celular. Este hallazgo sugiere que las microondas pulsadas pueden ejercer efectos cocancerígenos en combinación con un agente químico que aumente la razón de proliferación de las células transformadas. A la fecha, no se ha realizado ningún intento por replicar estos resultados ni están claras sus implicaciones en materia de efectos en la salud humana.

Repacholi *et al.* (1997) han reportado un estudio sobre la exposición de cien ratones transgénicos de sexo femenino sometidos a campos de 900 MHz, pulsados a 217 Hz, con un ancho de pulso de 0,6 μ s durante 18 meses, que produjo una duplicación en la incidencia de linfomas en comparación con 101 controles. Sin embargo, dado que los ratones de sexo femenino estaban libres para moverse en sus jaulas, resultó amplia la variación del SAR (0,01 W/ kg-4,2 W/ kg); por tanto, se hace muy difícil establecer el efecto real. Dado que la tasa metabólica en descanso de estos ratones del sexo femenino es de 7 W/kg a 15 W/kg, únicamente, el extremo superior del rango de exposición puede haber producido un poco de calor. De este modo, parece que este estudio sugie-

re la posible actuación de un mecanismo no térmico que requiere de una investigación más profunda. No obstante, antes de poder hacer suposiciones con respecto al riesgo para la salud, es necesario tratar un número de cuestiones. El estudio debe replicarse restringiendo a los animales con miras a disminuir la variación en la exposición a SAR y para determinar si existe una respuesta a la dosificación. Se requiere de más estudios con vistas a determinar si los resultados pueden encontrarse en otros animales, con la finalidad de generalizarlos a los seres humanos. Asimismo, es esencial evaluar si los resultados hallados en los animales transgénicos son (o no) aplicables a los seres humanos.

Existen numerosos trabajos que hacen referencia al posible efecto cancerígeno de las radiaciones no ionizantes. Los resultados obtenidos por estos y otros autores son inconsistentes; son estudios muy diferentes en cuanto al diseño, la ejecución y la interpretación de los experimentos realizados y, además, ni los efectos encontrados ni sus implicaciones sobre la salud humana están suficientemente dilucidados científicamente.

Efectos sobre la reproducción humana

Dos estudios extensivos en mujeres que habían sido tratadas con diatermia de microondas para aliviar el dolor de las contracciones uterinas durante la labor de parto, no hallaron evidencia alguna de efectos negativos para el feto (Daels, 1973, 1976). Sin embargo, produjeron resultados (tanto positivos, como negativos) siete estudios sobre los efectos en la gestación entre trabajadoras con exposición ocupacional a la radiación por microondas y sobre los defectos de nacimiento entre su prole.

En algunos de los estudios epidemiológicos realizados con poblaciones de soldadoras de plástico y fisioterapeutas femeninas que trabajaban con dispositivos de diatermia con onda corta, no hubo efectos estadísticamente significativos sobre las tasas de

aborto ni de malformaciones fetales (Källén, Malmquist y Moritz, 1982). En cambio, otros estudios sobre poblaciones similares de trabajadoras femeninas hallaron un riesgo mayor de aborto espontáneo y defectos de nacimiento (Larsen, Olsen y Svane, 1991; Ouellet-Hellstrom y Stewart, 1993).

Prasad (2001) realizó un estudio con cien trabajadores (59 soldados y 41 sastres) expuestos a campos de microondas, sin encontrar alteraciones significativas sobre la fertilidad. Otro estudio con trabajadores de los radares no halló asociación alguna entre la exposición a las microondas y el riesgo del síndrome de Down entre su prole (Cohen *et al.*, 1977).

En general, los estudios sobre los efectos reproductivos de la exposición a microondas adolecen de una buena evaluación de los tiempos y la intensidad de exposición, y, en muchos casos, fueron efectuados con cantidades de sujetos reducidas. Pese a los resultados, generalmente, negativos de estos ensayos, será difícil extraer conclusiones firmes acerca de los riesgos reproductivos sin mayores datos epidemiológicos sobre los individuos con una exposición elevada y una evaluación más precisa de la exposición.

Efectos en el sistema auditivo

Comparados con la radiación de onda continua (OC), los campos de microondas pulsadas con la misma tasa promedio de deposición energética en tejidos, por lo general, son más eficientes en la producción de respuestas biológicas, sobre todo cuando existe un umbral bien definido que debe ser superado para producir el efecto (ICNIRP 1996). En este sentido, el efecto de *audición de microondas* es un ejemplo bien conocido (Frey, 1961; Frey y Messenger, 1973; Lin 1978): las personas con una audición normal pueden percibir los campos de pulso modulado con frecuencias entre 200 MHz y 6,5 GHz; la sensación auditiva ha sido descrita en diversas formas: como un zumbido, un chasquido o un estallido, según las características de modulación del campo. Los efectos au-

ditivos de microondas se atribuyen a una interacción termoelástica en el córtex del cerebro, con un umbral de percepción de 100 mJ/m² a 400 mJ/m² para pulsos de duración menores a 30 μ s con una frecuencia de 2,45 GHz. La exposición repetida o prolongada a los efectos auditivos de las microondas puede ser estresante y potencialmente dañina.

Efectos en la esfera neurosíquica

Se han reportado mayores alteraciones para la salud en la *esfera neurosíquica*. Hay autores que reportan *síntomas neurosíquicos independientes*, tales como la confusión, la pereza, la pérdida de la memoria, la ansiedad, la depresión, mientras que otros autores los agrupan como el síndrome de las microondas (Portales, 2002).

Efectos en el sistema hematopoyético

Stras investigaciones han encontrado aumentos en las cifras de hemoglobina, así como modificaciones leucocitarias que dependen de la potencia de energía de las microondas por estrés térmico que son reversibles (Laurens, 1982).

Efectos en el sistema inmunológico

Castillo, Pérez y Almeida (1992) también han reportado en sus estudios procesos alérgicos, depresión del sistema inmunológico, modificaciones linfocitarias, macrofágicas y hematológicas, sin conocerse hasta qué punto o de qué manera estas alteraciones influyen sobre la salud humana.

Efectos en el aparato cardiovascular

Las principales alteraciones estudiadas en esta esfera se relacionan con alteraciones de la repolarización, infartos cardíacos algunos años después de la exposición laboral a los campos electromagnéticos y otros. Graham *et al.* (2000) son del criterio que los efectos adversos sobre este sistema son muy controversiales.

Los datos disponibles sobre la exposición de humanos a la energía de las microondas son limitados, en especial, para exposiciones de larga duración. Ha habido algunos experimentos de exposición de humanos a niveles de radiación similares a los de los teléfonos móviles y radar, pero no se ha encontrado ninguna evidencia de posibles efectos dañinos. Una revisión excelente de la literatura disponible en este campo puede encontrarse en Moulder *et al.* (1999) y en International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2004).

La International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1996) plantea que los estudios que correlacionan la radiación electromagnética no-ionizante con daños a la salud presentan, de alguna manera, problemas metodológicos. El principal inconveniente de los estudios poblacionales es la aparición de variables ocultas; por ejemplo, las personas que viven cerca de torres de alta tensión resultan de menor poder adquisitivo o que vivan en peores condiciones de salud, higiene y educación. Además, falta establecer los mecanismos causales por los cuales la radiación electromagnética no-ionizante afecta a los seres vivos. Se señala que este tipo de radiación no interactuaría con la materia, salvo mediante los efectos térmicos mencionados.

Robinette *et al.* (1980) plantean que en los Estados Unidos fueron estudiados los efectos de la radiación de microondas por radar en la salud de los soldados que sirvieron en medios navales durante el período de la Guerra de Corea (1950-1954). Se estudiaron 20 000 hombres con una oportunidad máxima de exposición a las microondas, y 20 000 con un potencial mínimo para la exposición. La exposición potencial se evaluó en términos de derechos laborales, la duración de tiempo en la ocupación y la potencia de los equipos en el momento de la exposición, y los indicadores de salud estudiados fueron la causa de muerte, la hospitalización durante y posterior al servicio militar, y la compensación de discapacidad. Como

conclusión del estudio, no se detectaron efectos adversos en los índices que podrían atribuirse a los posibles riesgos de radiación de microondas.

En uno de sus estudios, Ruzicka (2007) señala que el promedio de vida disminuye en 10 años para los habitantes que viven cerca de una antena emisora de contaminación electromagnética, en comparación con los que viven alejados de ese tipo de antena.

Hardell (2008) analiza determinados estudios que indican que la exposición a campos de microondas con niveles mucho más bajos que los límites descritos en las *Recomendaciones internacionales*, pueden resultar peligrosos por exposición prolongada en plazos de 10 años; por ejemplo, la exposición a teléfonos móviles y antenas de telefonía, entre otras fuentes. Hardell sugiere tomar medidas precautorias, y aboga por nuevas medidas de restricción en los espacios habitables para niños y mujeres embarazadas, y para la exposición acumulativa a microondas en espacios abiertos.

En su estudio sobre los campos electromagnéticos y sus efectos en salud, Alonso, García y Onaindia (2011) refieren que los radares emiten señales en forma de pulsos de microondas, y que la potencia máxima de cada pulso puede ser alta, aunque la potencia media sea pequeña; señalan, además, que muchos radares pueden girar o moverse arriba y abajo, lo cual reduce la densidad de potencia media a la que están expuestas las personas en lugares cercanos a los radares.

La Organización Mundial de la Salud reconoce que los estudios epidemiológicos realizados resultan, por el momento, insuficientes para evaluar los riesgos que causa la exposición a las radiofrecuencias en la salud humana (World Health Organization, 1999; Organización Internacional del Trabajo, 1997; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004).

Conclusiones

Los efectos directos más evidentes de las microondas sobre la salud humana, según las demostraciones obtenidas de estudios en diferentes modelos biológicos, se reconocen como aquellos de naturaleza térmica, o sea, los que provocan el calentamiento de los tejidos y sus consecuencias más inmediatas. Asimismo, se evidencia la necesidad de tener en cuenta los mecanismos termorregulatorios del organismo humano, un factor muy difícil de cuantificar.

Los efectos cancerígenos, genotóxicos o sobre el buen funcionamiento de los sistemas circulatorios, reproductivo o sobre el proceder conductual de las personas, han sido demostrados mediante estudios sobre modelos biológicos indirectos o con estudios epidemiológicos de larga duración de la exposición.

Dadas la dispersión y la naturaleza de los hallazgos científicos aportados por las investigaciones sobre la interacción de las radiaciones de microondas en los humanos, se evidencia la necesidad de continuar su estudio, así como limitar la exposición humana a determinados niveles permisibles. En todos los casos estudiados, se hace muy difícil cuantificar los niveles de exposición a que fueron sometidos los sujetos.

Se han realizado múltiples revisiones de las evidencias científicas publicadas sobre este tema y, a pesar de que la Organización Mundial de la Salud reconoce la necesidad de más evidencias sobre la acción de las microondas, se propone aplicar el *principio de precaución* aun cuando las evidencias sean discrepantes o existan cuestiones abiertas.

Teniendo en cuenta estos estudios, se hace evidente la necesidad de una gestión ambiental adecuada de la radiación de microondas emitidas por los radares meteorológicos en Cuba, con vistas a garantizar una operación segura de estos, sin afectaciones a la salud humana.

Referencias

- Abshaev, M. T., I. I. Burtsev, S. I. Vaksemburg, G. F. Shevelá, 1980, *Manual para el empleo de los radares MRL-4, MRL-5 y MRL-6 en el sistema de protección antigranizo* (en ruso), Ed. Hidrometizdat, 230 pp.
- Abshaev, M. T. y V. I. Rozemberg, 1969, *Dispersión y atenuación de las microondas en el granizo* (en ruso). Comunicaciones de la Academia de Ciencias de la URSS, Física de la Atmósfera y el Océano, t. 5, no. 9:803-809.
- Adair, E. R., B. W. Adams and G. M. Akel, 1984, “Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave induced alteration of thermoregulatory behavior”, *Bioelectromagnetics*, 5:13-30.
- Adair, E. R., and B. W. Adams, 1980, “Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkeys”, *Bioelectromagnetics*, 1:1-20.
- Aden A. L. and M. Kerker, 1951, “Scattering of electromagnetic waves by two concentric spheres”, *J. Applied Physics*, 22: 1242-1246.
- American Conference of Government Industrial Hygienists, 1996, “Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices”. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Alonso E., R. García, y C. Onaindia, 2011, “Campos electromagnéticos y efectos en salud”. Subdirección de Salud Pública de Bizkaia, nov. 2007, acceso nov. 2013, disponible en: http://www.osakidetza.euskadi.net/r85-gkgnr100/es/contenidos/informacion/cem_salud/es_cem/adjuntos/cem.pdf.
- Alvarez, L, 2000, “¿Qué es y cómo nos afecta? La contaminación electromagnética y sus efectos sobre la salud”, acceso oct. 2013, disponible en: <http://www.ambientecologico.com>.
- Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación, 1993, “Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)”, Ginebra: Organización Mundial de la Salud, Environmental Health Criteria, 137.

- Atlas, D. (ed), 1990, "Radar in Meteorology", American Meteorological Society, Boston, Massachusetts.
- Balcer-Kubiczek, E. K. and G. H. Harrison, 1991, "Neoplastic transformation of C3H / 10T1 / 2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter", *Radiat. Res.*, 126:65-72.
- Barron, C. I., and A. A. Baraff, 1958, "Medical considerations of exposure to microwaves (radar)", *J. Am. Med. Assoc.*, 168:1194-1199.
- Beall, C., E. Delzell, P. Cole, and I. Brill, 1996, "Brain tumors among electronics industry workers", *Epidemiology*, 7:125-130.
- Castellanos, J.P, 2002, "Peligros de las ondas electromagnéticas sobre la salud", acceso nov. 2013, disponible en: <http://www.robotier.com/castellano/index.jsp>.
- Castillo, A., D. Pérez, y E. Almeida, 1992, "Efecto de las radiaciones electromagnéticas no-ionizantes sobre la inmunidad humoral y celular en trabajadores expuestos", *Revista Cubana Medicina Militar*, 21(2):85-92
- Chatterjee, I., D. Wu and O. P. Gandhi, 1986, "Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 33:486-494.
- Chen, J. Y. y O. P. Gandhi, 1988, "Thermal implications of high SARs in the body extremities at the ANSI-recommended MFVHF safety levels", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 35:435-441.
- Chou, C.K., A. W. Guy, L. I. Kunz, R. B. Johnson, J. J. Crowley and J. H. Krupp, 1992, "Long-term, low-level microwave irradiation of rats", *Bioelectromagnetics*, 13:469-496.
- Cohen, B. H., A. M. Lillienfield, A. M. Kramer and L. C. C. Hyman, 1975, "Parental factors in Downs syndrome: results of the second Baltimore case control study", en Hook, E. B., Porter, I. H., eds.: *Population cytogenetics studies in humans*, pp. 301-352, Academic Press, Nueva York 1977.
- Cridland, N. A, 1993, *Electromagnetic fields and cancer: a review of relevant cellular studies*, Chilton, UK: National Radiological Protection Board, Report NRPB-R256.
- Daels, J, 1973, "Microwave heating of the uterine wall during parturition", *Obstet. Gynecol.*, 42:76-79.
- Daels, J, 1976, "Microwave heating of the uterine wall during parturition", *J. Microwave Power*, 11:166-167.
- D'Andrea, J. A., J. R. DeWitt, O. P. Gandhi, S. Stensaas, J. L. Lords and H. C. Neilson, 1986, "Behavioral and physiological effects of chronic 2450-MHz microwave irradiation of the rat at 0.5 mW / cm²", *Bioelectromagnetics*, 7:45-56.
- De Jorge, J. O. and C. S. Ezell, 1980, "Observing responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves", *Bioelectromagnetics*, 1:183-198.
- Del Busto, C. y A. Díaz, 1987, "Estudio comparativo de características del semen en militares que trabajan con supra alta frecuencia", *Medicina Militar*, 1(31):59-62.
- Dimbylow, P. J, 1997, "FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz". *Phys. Med. Biol.*, 42:479-490.
- Dimbylow, P. J. and S. M. Mann, 1994, "SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz". *Phys. Med. Biol.*, 39:1537-1553.
- Dolk, H. H. Shaddick, P. Walls, C. Grundy, B. Thakrar, I. Kleinschmidt and P. Elliot, 1997a, "Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter", *Am. J. Epidemiol.*, 145:1-9.
- Dolk, H., P. Elliot, G. Shaddick, P. Walls and B. Thakrar, 1997b, "Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters", *Am. J. Epidemiol.*, 145:10-17.

- Eger, H., K. Uwe, P. Vogel, y H. Voit, 2004, “La influencia de la cercanía de una antena de telefonía móvil sobre la incidencia del cáncer”. Publicado en la revista: *Umwelt•medizin•gesellschaft*, 17, 4/2004.
- Ferrer, D, 1989, “Microondas y radiofrecuencias: generación, aplicaciones y control de riesgos”, *Revista Condiciones de Trabajo y Salud*, no. 76: Salud y trabajo, CNNT de Madrid Insht., acceso nov. 2013, disponible en: www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/.../NTP/.../ntp_523.pdf.
- Frey, A. M, 1961, “Auditory system response to radio-frequency energy”, *Aerospace Med.*, 32:1140-1142.
- Frey, A. M. and R. Messenger, 1973, “Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation”, *Science*, 181:356-358.
- Guerrero, J. y J. L. Pérez, 2006, “Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana”, Instituto Superior de Medicina Militar “Dr. Luis Díaz Soto”, acceso feb. 2013, disponible en: http://bvs.sld.cu/revistas/mil/vol35_3_06/mil08306.htm.
- González, JF, 1978, “Higiene del trabajo militar en estaciones de radiolocalización”. Conferencia, Editor CNIMM-ISM, La Habana, 1978.
- Graham, C., A. Sastre, M. R. Cook, and R. Kavet, 2000, “Exposure to strong ELF fields does not alter cardiac autonomic control mechanism”, *Bioelectromagnetics*, 21(suppl 6):412-3.
- Grayson, J. K, 1996, “Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested casecontrol study”, *Am. J. Epidemiol.*, 143:480-486.
- Guerrero, J. y J. L. Pérez, 2006, “Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana”. Instituto Superior de Medicina Militar “Dr. Luis Díaz Soto”, acceso feb. 2013, disponible en: http://bvs.sld.cu/revistas/mil/vol35_3_06/mil08306.htm.
- Guy, A. W., J. C. Lin, P. O. Kramar, and A. Emery, 1975, “Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye”, *IEEE Transactions on Microwave Theory Techni-*
- que*, 23:492-498.
- Hardell, L. and C. Sage, 2008, “Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards”, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 62 (2008) 104-109.
- Hocking, B., I. R. Gordon, M. L. Grainand G. E. Hatfield, 1996, “Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers”, *Med. J. Australia*, 165:601-605.
- Hoque, M. and O. P. Gandhi, 1988, “Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposures at the ANSI recommended safety levels”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 35:442-449.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1996, “Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters”, *Health Phys.*, 70:587-593.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998, “Directrices para Limitar la Exposición ante los Campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos de Tiempo Variable”, *Health Phys.*, 74:401-441.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004, “Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure”, *Environmental Health Perspectives*, 112:1741-1754.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1988, *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, 4th. ed., New York.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1992, *Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz*, Nueva York, Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE C95.1-1991.
- Jokela, K., L. Puranen, and O. P. Gandhi, 1994, “Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency /high-frequency broadcast antennas”, *Health Phys.*, 66:237-244.
- Källén, B., G. Malmquist and U. Moritz, 1982, “Delivery outcome among physiotherapists in Sweden:

- Is non-ionizing radiation a fetal hazard?”, *Arch. Environ. Health*, 37:81-85.
- Lai, H., and N. P. Singh, 1995, “Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells”, *Bioelectromagnetics*, 16:207-210.
- Lai, H., and N. P. Singh, 1996, “Single-and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation”, *Int. J. Radiation Biol.*, 69:513-521.
- Larsen, A. I., J. Olsen, and O. Svane, 1991, “Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists”, *Scand. J. Work Environ. Health*, 17:324-329.
- Laurens, A. (1982): Efectos hematológicos de las microondas. *Med Armees*. 10(7):643-8.
- Lillienfeld, A. M., J. Tonascia, S. Tonascia, C. A. Libauer and G. M. Cauthen, 1978, “Foreign service health status study-evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts”. Final report, Washington, DC: Department of State; Contract no. 6025-619073, NTIS PB-288163.
- Lin, J. C. (1978): “Microwave auditory effects and applications”. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Magin, R. L., R. P. Liburdy and B. Persson, 1992, “Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy”, *Ann. NY Acad. Sci.*, 649.
- McKinlay, A. F, J. B. Andersen, J. H. Bernhardt, M. Grandolfo, K. A. Hossmann, K. H. Mild, A. J. Swerdlow, M. Van Leeuwen, L. Verschaeve and B. Veyret, 1996, “Radiotelephones and human health-proposal for a European research programme”. Report of European Commission Expert Group, Brusellas XIII.
- Michaelson, S. M, 1983, “Biological effects and health hazards of RF and MW energy: fundamentals and overall phenomenology”, en: Grandolfo, M., S. M. Michaelson and A. Rindi eds.: *Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation*, Nueva York, Plenum Press, 1983: 337-357.
- Michaelson, S. M. and E. C. Elson, 1996, “Modulated fields and ‘window’ effects”, en: Polk, C. y Postow, E., eds.: *Biological effects of electromagnetic fields*, Boca Raton, FL, CRC Press, 1996: 435-533.
- Mie, G, 1908, “Beiträge zur Optik trüber Mediem speziell kolloidaler Metallösungen” (en alemán), *Annal of Physics*, 25: 377-445.
- Moulder, J. E., L. S. Erdreich, R. S. Malyapa, J. Merritt, W. F. Pickard, and Vijayalaxmi, 1999, “Cell phones and cancer: what is the evidence for a connection?”, *Rad. Res.*, 151, 513-531.
- National Council on Radiation Protection, 1993, *A practical guide to the determination of human exposure to radiofrequency fields*. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement, NCRP Report, 119.
- National Radiation Protection Board, 2001, *ELF electromagnetic fields and risk of cancer report of an Advisory Group on Non-Ionising Radiation*, NRPB.12(1):1.
- National Radiological Protection Board, 1991, *Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: III: Radiofrequency and microwave radiation*, Chilton, UK, National Radiological Protection Board, Report R-240.
- National Radiological Protection Board, 1992, *Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation*, Chilton, UK, National Radiological Protection Board, NRPB Documents, 3(1).
- Ouellet-Hellstrom, R. and W. F. Stewart, 1993, “Miscarriages among female physical therapists, who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation”, *Am. J. Epidemiol.*, 138:775-786.
- Organización Internacional del Trabajo (OIT), 1997, *Boletín no. 69. Electricidad y Radiación*.
- Pavlov, N. F, 1980, *Aerología, radiometeorología y pro-*

- tección del trabajo (en ruso), Hidrometizdat, 405 pp.
- Polk, C. and E. Postow, 1998, “Biological effects of electromagnetic fields”, 2nd. ed., Boca Raton, FL, CRC Press, 1996, 518 Health Physics April 1998, vol. 74, no. 4.
- Polk, C. and E. Postow, 1996, “Biological effects of electromagnetic fields”, 2nd. ed., Boca Raton, FL, CRC Press.
- Portales, M., 2002, “Contaminación electromagnética y salud”, acceso abril de 2013, disponible en: <http://www.mediterraneo.org/cae>.
- Prasad, S. K. and S. Vyas, 2001, “Health problems among workers of iron welding machines: effects of electromagnetic fields”, *J. Environ Biol*, 22(2):129–32.
- Ramsey, J. D. and Y. C. Kwon, 1988, “Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat”, en: *Proceedings Seminar on heat stress indices*, Luxemburgo, CEC.
- Repacholi, M. H., 1998, “Low-level exposure to radio-frequency fields: health effects and research needs”, *Bioelectromagnetics*, 19:1–19.
- Repacholi, M. H., A. Basten, V. Gebiski, D. Noonan, J. Finnie and A. W. Harris, 1997, “Lymphomas in Em-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields”, *Rad. Res.*, 147:631–640.
- Rinehart, R. E., 2007, *El radar para los meteorólogos* (en español), Rinehart Publishing.
- Robinette, C. D., C. Silverman and S. Jablon, 1980, “Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar)”, *Am. J. Epidemiol.*, 112:39–53.
- Rodríguez, O.L., 2006, “Datos significativos de la Red de Radares de Cuba”. Informe técnico (inédito), depositado en la biblioteca del Insmet.
- Rodríguez, O.L., L. L. Fernández, R. A. Naranjo, A. Barreiras, A. A. Peña, M. Diez, W. Pozas, M. O. Aguiar, J. L. Pérez, 2006, “Cuban Weather Radar Network. Recent Advances and Future Plans”, en: *Proceedings of ERAD 2006*, European Meteorological Union.
- Rodríguez, O. L., W. J. Pozas, L. L. Fernández, R. A. Naranjo, A. A. Peña, A. Barreiras, J. L. Pérez, V. Rodríguez, and A. E. Castillo, 2012, “Modernization of the Cuban Weather Radar Network looking for a regional integration”, en: *Proceedings of the 3rd WMO International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting (WSN12)*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Rothman, K. J., C. K. Chou, R. Morgan, Q. Balzano, A. W. Guy, D. P. Funch, S. Preston-Martin, J. Mandel, R. Steffens and G. Carlo, 1996a, “Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research”, *Epidemiology*, 7:291–298.
- Rothman, K. J., J. E. Loughlin, D. P. Funch and N. A. Dreyer, 1996b, “Overall mortality of cellular telephone customers”, *Epidemiology*, 7:303–305.
- Ruzicka, F., 2007, “Auswirkungen von gsm-mobilfunkbasisstationen auf die lebenszeit einer bevölkerung”, *Revista Umwelt.medizin.gesellschaft*, 20, 2/2007.
- Salford, L. G., A. Brun and J. L. Eberhardt, 1993, “Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. Bioelectrochem”, *Bioenerg.*, 30:313–318.
- Santini, R., M. Hosni, P. Deschaux and H. Paccoco, 1988, “B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation”, *Bioelectromagnetics*, 9:105–107.
- Sarkar, S., S. Ali and J. Behari, 1994, “Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis”, *Mutation Res.*, 320:141–147.
- Shellock, F. G. and J. V. Cruess, 1987, “Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T”, *Radiology*, 163:259–262.
- Skolnik, M. I. (ed), 2008, *Radar Handbook*, 3rd. ed., chapter 1: “An introduction and Overview on Radar”, McGraw Hill Book Co., 1.13 p.

- Sliney, D. and M. Wolbarsht, 1980, "Safety with laser and other optical sources". Londres: Plenum Press.
- Stern, S., L. Margolin, B. Weiss, S. T. Lu and S. M. Michaelson, 1979, "Microwaves: effects on thermoregulatory behavior in rats", *Science*, 206:1198-1201.
- Szmigielski, S, 1996, "Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation", *Sci. Tot. Environ.*, 180:9-17.
- Szmigielski, S., A. Szudinski, A. Pietraszek, M. Bielec and J. K. Wrembel, 1982, "Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation", *Bioelectromagnetics*, 3:179-191.
- Szmigielski, S., M. Bielec, S. Lipski, G. Sokolska, 1988, "Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low level microwave and radiofrequency fields", en: Marino, A. A., ed.: *Modern bioelectricity*, Nueva York, Marcel Dekker, 861-925 pp.
- Tenforde, T. S, 1991, "Biological interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields", *Bioelectrochem. Bioenerg.*, 25:1-17.
- Tenforde, T. S, 1992, "Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources", *Ann. Rev. Public Health*, 13:173-196.
- Tofani, S., G. D'Amore, G. Fiandino, A. Benedetto, O. P. Gandhi and J. Y. Chen, 1995, "Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 37:96.
- Williams, G. M, 1996, "Comment on 'Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells' by Henry Lai and Narendra P. Singh", *Bioelectromagnetics*, 17:165.
- Yassi, A., T. Kjellström, T. Kok, and T. Guidotti, 2002, *Salud ambiental básica (en español)*, Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología, 3-22 pp., acceso nov. 2013, en: <http://www.ambiente.gov.ar/infoteca/descargas/yassi01.pdf>.