

Artículo traducido al castellano por Ecologistas en Acción (abierto a revisión), ante cualquier duda contrastar con el documento original en inglés:

Comisión Internacional sobre los Efectos Biológicos de los Campos Electromagnéticos (ICBE-EMF). “Las pruebas científicas invalidan los supuestos de salud subyacentes a las determinaciones de los límites de exposición a la radiación de radiofrecuencia de la FCC y la ICNIRP: implicaciones para la 5G”. *Environmental Health*. Volumen 21, artículo 92 (2022). Fuente: <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>

Original article (English): International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields (ICBE-EMF). “Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G”. *Environmental Health*. Volume 21, Article number: 92 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>. This original article in English is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Las pruebas científicas invalidan los supuestos sanitarios en los que se basan las determinaciones de los límites de exposición a la radiación de radiofrecuencia de la FCC y la ICNIRP: implicaciones para la 5G

Comisión Internacional sobre los Efectos Biológicos de los Campos Electromagnéticos (ICBE-EMF).

Igor Belyaev, Carl Blackman, Kent Chamberlin, Alvaro DeSalles, Suleyman Dasdag, Claudio Fernández, Lennart Hardell, Paul Héroux, Elizabeth Kelley, Kavindra Kesari, Don Maisch, Erica Mallery-Blythe, Ronald L. Melnick, Anthony Miller, Joel M. Moskowitz, Wenjun Sun & Igor Yakymenko.

Resumen

A finales de la década de 1990, la FCC y la ICNIRP adoptaron límites de exposición a la radiación de radiofrecuencia (RF) para proteger a las personas trabajadoras, así como al público en general, de los efectos adversos de la radiación de RF. Estos límites se basaron en los resultados de los estudios de comportamiento realizados en la década de 1980, que incluían exposiciones de 40 a 60 minutos en 5 monos y 8 ratas, y en la aplicación de factores de seguridad arbitrarios a un aparente umbral de la Tasa de Absorción Específica (TAS -SAR en inglés-) de 4 W/kg. Los límites también se basaban en dos supuestos principales: que cualquier efecto biológico se debía a un calentamiento excesivo de los tejidos y que no se producirían efectos por debajo del presunto umbral de la TAS (SAR), así como en doce supuestos que no fueron especificadas ni por la FCC ni por la ICNIRP. En este documento, mostramos cómo los últimos 25 años de investigación exhaustiva sobre la radiación de RF demuestran que los supuestos en las que se basan los límites de exposición de la FCC y la ICNIRP no son válidas y siguen suponiendo un perjuicio para la salud pública. Los efectos adversos observados en exposiciones por debajo del supuesto umbral de la TAS (SAR) incluyen la inducción no térmica de especies reactivas de oxígeno, daños en el ADN, cardiomiopatía, carcinogenicidad, daños en el esperma y efectos neurológicos, incluida la hipersensibilidad electromagnética. Además, múltiples estudios en humanos han encontrado asociaciones estadísticamente significativas entre la exposición a la radiación de RF y un mayor riesgo de cáncer de cerebro y de tiroides.

Sin embargo, en 2020, y a la luz del conjunto de pruebas revisadas en este artículo, la FCC y la ICNIRP reafirmaron los mismos límites que se establecieron en la década de 1990. En

consecuencia, estos límites de exposición, que se basan en supuestos falsos, no protegen adecuadamente a las personas trabajadoras, a niñas y niños, a las personas hipersensibles, ni a la población en general, de las exposiciones a corto o largo plazo a la radiación de RF.

Por lo tanto, se necesitan urgentemente límites de exposición que protejan la salud de los seres humanos y el medio ambiente. Estos límites deben basarse en pruebas científicas y no en conjeturas erróneas, especialmente teniendo en cuenta el aumento de la exposición mundial de las personas y el medio ambiente a la radiación de RF, incluidas las nuevas formas de radiación de las telecomunicaciones 5G para las que no existen estudios adecuados sobre los efectos en la salud.

Introducción

Al establecer límites de exposición para agentes tóxicos o cancerígenos, las agencias reguladoras generalmente establecen estándares que tienen en cuenta las incertidumbres de los riesgos para la salud de la población en general [1] y de los subgrupos susceptibles, como niñas y niños [2]. Ese enfoque no se ha aplicado de la misma manera al establecimiento de límites de exposición para la radiación de radiofrecuencia (RF) (rango de frecuencia: 3 kHz a 300 GHz). Además, las suposiciones que subyacen a los límites de exposición a la RFR actuales son erróneas; por lo tanto, los límites que se aplican actualmente no protegen adecuadamente la salud humana y ambiental. Este tema se analiza con mayor detalle en el Supuesto #9.

Los límites de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) para la exposición máxima permisible a campos electromagnéticos (CEM) de RF [3] se establecieron en 1996 [4] y actualmente incluyen muchas recomendaciones de la Comisión Internacional sobre Protección contra la Radiación No Ionizante [5]. Se esperaba que estos límites de exposición protegieran contra los efectos adversos para la salud en humanos que podrían ocurrir por exposiciones a corto plazo (es decir, agudas) a la radiación de RF y han sido mantenidos por la FCC durante los últimos 26 años. Los límites de exposición establecidos por la FCC en 1996 se basaron en los criterios recomendados por el Consejo Nacional de Mediciones y Protección contra la Radiación (NCRP) [6] y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (ANSI/IEEE) [7, 8]. Los límites se “basaron en una determinación de que pueden ocurrir efectos biológicos potencialmente dañinos a un nivel de TAS (Tasa de Absorción Específica) de 4,0 W/kg como promedio en todo el cuerpo”. El TAS (SAR en inglés) es una medida de la tasa de energía de RF absorbida por unidad de masa.

Se consideró que el umbral para una respuesta conductual y para un daño térmico agudo en tejidos sensibles era una exposición que producía una TAS (SAR) de cuerpo entero superior a 4 W/kg. Paralelamente al desarrollo de los límites de exposición a radiación de RF de la FCC, las pautas de ICNIRP para limitar la exposición a CEM de RF también se basaron en estudios conductuales realizados en ratas y monos en la década de 1980 [9].

Los efectos nocivos que sirvieron de base para los criterios de exposición fueron los cambios en el comportamiento observados en un pequeño número de ratas y monos cuando se expusieron a radiación RF durante un máximo de 60 minutos a densidades de potencia en las que la SAR de todo el cuerpo era de aproximadamente 4 W/kg o mayor [10, 11]. Esos estudios fueron realizados a principios de la década de 1980 (1980 y 1984, respectivamente) por investigadores del Departamento de Marina de los EE. UU. En consecuencia, 4 W/kg se identificó como el umbral de TAR para los efectos adversos para la salud inducidos por la radiación a RF. En monos privados de alimentos que fueron expuestos a tres frecuencias diferentes (225 MHz, 1,3 GHz y 5,8 GHz) durante sesiones de 60 minutos, las tasas de respuesta al presionar la palanca para la

entrega de gránulos de comida se redujeron en comparación con las sesiones de exposición simulada. Se informó que el umbral de TAS (SAR) para esta disminución de la respuesta oscilaba entre 3,2 y 8,4 W/kg [11]. De manera similar, en ratas privadas de alimentos expuestas a sesiones de 40 minutos a 1,28 o 5,62 GHz de radiación, se informó que el umbral de TAS (SAR) para una disminución en la tasa de respuesta oscilaba entre aproximadamente 3,8 y 4,9 W/kg [10]. En estudios experimentales en los que se expuso a monos en una cámara anecoica durante 4 horas a radiación de 1,29 GHz a varias densidades de potencia, un aumento de la temperatura corporal media de 0,7 °C se asoció con una TAS (SAR) de cuerpo entero de 4 W/kg [12]. Se supuso que la alteración del comportamiento asociada con un aumento de la temperatura corporal de aproximadamente 1,0 °C era la medida más sensible de los efectos nocivos de la exposición a campos electromagnéticos (CEM) de RF.

Después de establecer 4 W/kg como dosis umbral para los efectos nocivos agudos, tanto la FCC [3, 4] como la ICNIRP [5, 9] fijaron los límites de exposición para las exposiciones ocupacionales controladas en 0,4 W/kg de la TAS (SAR) media para todo el cuerpo (basándose en la aplicación de un factor de seguridad/incertidumbre de 10 veces). Para la población general, los límites de exposición de la FCC y la ICNIRP se fijaron en 0,08 W/kg de la TAS (SAR) media para todo el cuerpo (aplicando un factor de seguridad/incertidumbre adicional de 5 veces) para las frecuencias entre 3 MHz y 3 GHz. Los límites de exposición establecidos por la FCC y la ICNIRP no tienen en cuenta el impacto de las diferentes características de la señal, como las modulaciones de la onda portadora o la pulsación de la señal. Las exposiciones de todo el cuerpo para la población general se basan simplemente en los niveles de potencia promediados durante períodos de 30 minutos [3, 5].

Basándose en las distribuciones de TAS (SAR) de las exposiciones de cuerpo entero en las que se estimó que las TAS locales (es decir, de cuerpo parcial) eran de 10 a 20 veces el valor promedio, los límites de exposición local se establecieron 20 veces más altos que el límite medio de exposición de cuerpo entero [4,5,6,7]. Para las exposiciones ocupacionales, la FCC y la ICNIRP permitieron límites de exposición máxima local de hasta 8 W/kg promediados en cualquier tejido de 1 g de masa, considerada en forma de cubo [4] o 10 W/kg promediados en cualquier tejido contiguo de 10 g [9], respectivamente. Para la población general, los picos locales de TAS para las exposiciones parciales del cuerpo no deben superar los 1,6 W/kg promediado sobre cualquier tejido de un 1 g de masa, considerada en forma de cubo [3], o no deben superar los 2,0 W/kg promediados sobre cualquier tejido de 10 g de masa, considerada en forma de cubo [5]. Se permiten valores límite más altos para las extremidades. Las extremidades incluyen las manos, las muñecas, los pies, los tobillos y los pabellones auriculares (la parte externa del oído), a pesar de la proximidad del oído al cerebro. Estos ajustes se hicieron mucho antes de que se generalizara el uso de dispositivos de comunicación inalámbricos en los que la antena emisora suele estar cerca de órganos corporales locales como el cerebro. El documento del Consejo Nacional de Mediciones y Protección contra la Radiación de EE.UU. (NCRP) [6] reconoce que las exposiciones podrían ser mayores que los valores límite de seguridad recomendados cuando las personas están muy cerca de emisores de radiación de RF.

El establecimiento de los límites de exposición para la prevención del calentamiento excesivo de los tejidos se basó en los siguientes supuestos: 1) las ondas electromagnéticas en las frecuencias utilizadas en las comunicaciones inalámbricas no tienen energía suficiente para romper los enlaces químicos o ionizar las moléculas [13]; 2) la radiación de RF no podría dañar el ADN; y 3) el calentamiento de los tejidos era el único efecto biológico posible de la radiación no ionizante [5, 9, 14,15,16]. En cuanto a los posibles problemas medioambientales y de salud humana que

no se abordan al establecer los límites de exposición (por ejemplo, los efectos de las exposiciones crónicas, o los efectos de la coexposición de la piel a la radiación de RF y a otros agentes medioambientales, como ocurriría con la exposición a la 5G en combinación con la luz solar), la suposición implícita es que tales efectos no importan, o que el factor de seguridad/incertidumbre seleccionado arbitrariamente es suficiente para hacer frente a esas preocupaciones. En cualquier caso, se espera que los supuestos subyacentes aplicados a las evaluaciones de riesgo para la salud se describan claramente [1].

Los límites de exposición a la radiación de radiofrecuencia se basan en numerosos supuestos; sin embargo, los estudios de investigación publicados en los últimos 25 años muestran que la mayoría de esos supuestos no están respaldados por pruebas científicas. En el informe del NCRP [6], los autores señalan que cuando se conozcan mejor los efectos biológicos de la radiación de radiofrecuencia, habrá que evaluar y posiblemente revisar las directrices de exposición. El documento del ANSI/IEEE [7] también señala que los efectos de la exposición crónica o las pruebas de interacciones no térmicas podrían dar lugar a la revisión de las normas de exposición. Lamentablemente, estas recomendaciones nunca se han aplicado. Los organismos responsables de la protección de la salud pública deben probar y validar las hipótesis de seguridad de las exposiciones que podrían afectar negativamente a la salud humana o medioambiental antes de que se produzcan exposiciones generalizadas, y no después.

En este documento, destacamos los estudios que demuestran la falacia de los supuestos inherentes a las directrices de la FCC/ICNIRP para los límites de exposición a la radiación de RF, y descubrimos que los límites no protegen la salud humana y medioambiental. En este documento se abordan catorce supuestos que subyacen a los límites de exposición a la radiación de RF establecidos en la década de 1990 y reafirmados en 2020 por la FCC [4, 5] y la ICNIRP [5, 9], que se muestran en la Fig. 1.

Figura 1: Supuestos en los que se basan los límites de exposición a la radiación RF de la FCC y la ICNIRP

A. Efectos de la radiación RF en exposiciones por debajo del presunto umbral de la TAS (SAR) de 4 W/kg

- **Supuesto 1:** Existe un umbral de exposición para cualquier efecto adverso para la salud causado por la radiación de radiofrecuencia; en el rango de frecuencia de 100 kHz a 6 GHz es una exposición de cuerpo completo que excede una TAS de 4 W/kg. Cualquier efecto biológico de la radiación RF por encima del umbral de exposición se debe al calentamiento del tejido.

- **Supuesto 2:** La radiación de radiofrecuencia es incapaz de causar daños en el ADN salvo por calentamiento; no existe un mecanismo para el daño no térmico del ADN.

- **Supuesto 3:** De dos a siete exposiciones a la radiación de radiofrecuencia de hasta 1 hora de duración son suficientes para excluir los efectos adversos para cualquier duración de la exposición, incluidas las exposiciones crónicas.

- **Supuesto 4:** *No se producirían efectos adicionales de la radiación RF con la exposición conjunta a otros agentes ambientales.*

B. Factores que afectan a la dosimetría

- **Supuesto 5:** Los efectos sobre la salud dependen únicamente del valor de SAR promediado en el tiempo; las modulaciones de la onda portadora, la frecuencia o la pulsación no importan, salvo en la medida en que influyen en el SAR.

C. Riesgo de tumores cerebrales en los seres humanos

- **Supuesto 6:** Los múltiples estudios en humanos que encuentran asociaciones entre la exposición a la radiación de radiofrecuencia de los teléfonos móviles y el aumento del riesgo de tumores cerebrales son defectuosos debido a los sesgos de los estudios de casos y controles publicados, y porque las tasas de cáncer cerebral se han mantenido estables desde el momento en que se generalizó el uso de dispositivos de comunicación inalámbrica.

D. Variaciones individuales en la exposición y sensibilidad a los CEM de RF

- **Supuesto 7:** No existen diferencias entre los individuos, incluidos niñas y niños, en cuanto a la absorción de los CEM de RF y la susceptibilidad a esta radiación.

- **Supuesto 8:** No hay diferencias entre los individuos en cuanto a su sensibilidad a los efectos de la radiación de radiofrecuencia sobre la salud.

E. Factores de seguridad de CEM de RF aplicados a las personas trabajadoras y a la población en general

- **Supuesto 9:** Un factor de seguridad de 50 veces para la exposición de todo el cuerpo a la radiación de RF es adecuado para proteger a la población general de cualquier riesgo para la salud derivado de la radiación de RF.

- **Supuesto 10:** Un factor de seguridad de 10 veces para la exposición de todo el cuerpo a la radiación de radiofrecuencia es adecuado para proteger a las personas trabajadoras de cualquier riesgo para la salud derivado de la radiación de radiofrecuencia.

- **Supuesto 11:** La exposición de cualquier gramo de tejido, considerado en forma de cubo, hasta 1,6 W/kg, o de 10 g de tejido, considerado en forma de cubo, hasta 2 W/kg, (duración no especificada) no aumentará el riesgo de que ese tejido tenga efectos tóxicos o cancerígenos en la población general.

- **Supuesto 12:** La exposición de cualquier gramo de tejido, considerado en forma de cubo, hasta 8 W/kg, o de 10 g de tejido, considerado en forma de cubo, hasta 10 W/kg, (duración no especificada) no aumentará el riesgo de que ese tejido tenga efectos tóxicos o cancerígenos en las personas trabajadoras.

F. Exposición ambiental a las radiaciones de RF

- **Supuesto 13:** No hay preocupación por los efectos ambientales de la radiación de RF ni por los efectos en la fauna silvestre o los animales domésticos.

G. 5G (5ª generación inalámbrica)

- **Supuesto 14:** No se necesitan datos sobre los efectos en la salud de la exposición a la 5G; se supone que es segura porque la penetración se limita a la piel ("mínima penetración en el cuerpo")

Supuestos en los que se basan los límites de exposición a las radiaciones de RF y pruebas científicas que demuestran que estos supuestos no son válidos

A. Efectos de las radiaciones de RF en exposiciones inferiores al supuesto umbral SAR de 4 W/kg

Supuesto 1: *Existe un umbral de exposición para cualquier efecto adverso para la salud causado por la radiación de RF; en la gama de frecuencias de 100 kHz a 6 GHz es una exposición de todo el cuerpo que supera un SAR de 4 W/kg. Cualquier efecto biológico de la radiación de radiofrecuencia por encima del umbral de exposición se debe al calentamiento de los tejidos.*

Cardiomiopatía y carcinogenicidad

En respuesta a una solicitud del Centro de Dispositivos y Salud Radiológica de la Administración de Alimentos y Medicamentos norteamericana (FDA) [17], el Programa Nacional de Toxicología (NTP) realizó estudios de toxicidad y carcinogenicidad de la radiación de teléfonos celulares (modulados por CDMA o GSM) en ratas y ratones expuestos a radiación de RF a frecuencias de 900 MHz y 1800 MHz, respectivamente [18, 19]. Las exposiciones a radiación de RF durante un máximo de 2 años se produjeron en cámaras de reverberación durante 18 horas al día en un ciclo continuo de 10 minutos de encendido y 10 minutos de apagado. En las ratas, los niveles de la TAS (SAR en inglés) en todo el cuerpo durante los ciclos de 10 minutos de encendido fueron de 0, 1,5, 3 o 6 W/kg.

Los principales hallazgos histopatológicos del estudio del NTP en ratas macho [18] incluyeron aumentos relacionados con la dosis en la cardiomiopatía, aumento de la incidencia de cánceres y lesiones preneoplásicas en el corazón (schwannoma e hiperplasia de células de Schwann) y en el cerebro (glioma e hiperplasia de células gliales), aumentos en los tumores e hiperplasias de la próstata, aumentos significativos en los tumores de las glándulas suprarrenales y aumentos significativos en la incidencia general de neoplasias benignas o malignas en todos los órganos en los grupos de 3 W/kg. La incidencia de la cardiomiopatía también aumentó en las ratas hembras expuestas al GSM, y se encontraron aumentos significativos en el daño del ADN en ratas y ratones [18, 19]. De forma similar, un estudio anterior de Chou et al. [20] encontró un aumento significativo (3,6 veces) en la incidencia de neoplasias malignas primarias en ratas macho expuestas a radiación de RF pulsada de 2.450 MHz durante 25 meses (21,5 horas/día) con un SAR que oscilaba entre 0,15 y 0,4 W/kg.

Una revisión por pares externa de 3 días de los estudios del NTP confirmó que había "evidencia clara de actividad carcinogénica" en ratas macho para los schwannomas cardíacos, y "algunas pruebas de actividad carcinogénica" para los gliomas cerebrales y los tumores de las glándulas suprarrenales con la exposición a la radiación de RF modulada por GSM o CDMA [21]. Además, un estudio de por vida [durante toda su vida] realizado por el Instituto Ramazzini informó de un aumento significativo de los schwannomas cardíacos en ratas macho expuestas 19 horas al día a radiación RF modulada por GSM de 1800 MHz con una intensidad de campo de 50 V/m, equivalente a una TAS en todo el cuerpo de 0,1 W/kg [22]. La incidencia de la hiperplasia de células de Schwann del corazón también aumentó en ese grupo de exposición. Estos hallazgos son coherentes con los resultados del estudio del NTP y demuestran que el efecto proliferativo de la radiación de RF modulada en las células de Schwann del corazón es un hallazgo reproducible que puede producirse a dosis muy inferiores a la supuesta TAS (SAR) del cuerpo entero de 4 W/kg.

La ICNIRP [23] desestimó las pruebas de carcinogenicidad de la radiación de RF proporcionadas en los estudios del NTP [18] y del Instituto Ramazzini [22] basándose en su crítica anterior de dichos estudios [24]. Sin embargo, esa crítica demostró una desafortunada falta de comprensión junto con una tergiversación del diseño, la realización y la interpretación de los estudios de carcinogenicidad experimental en modelos animales [25], así como una falta de apreciación de la notable concordancia entre las respuestas tumorales observadas en animales de experimentación con las identificadas en los estudios de epidemiología del cáncer de los usuarios de teléfonos móviles descritos en el supuesto nº 6.

Ni los efectos del calentamiento ni el estrés térmico fueron probablemente la causa de los efectos adversos para la salud observados en el estudio del NTP [18], ya que no se observaron daños en los tejidos en un estudio de 28 días con la misma TAS (SAR), no hubo efectos significativos en el peso corporal durante el estudio de 2 años, y no hubo observaciones clínicas relacionadas con la exposición que indicaran estrés térmico o metabólico. Además, un estudio piloto térmico preliminar demostró que la temperatura corporal no aumentó más de 1° C a los niveles de exposición utilizados en los estudios crónicos [26], y no hay pruebas de que un pequeño cambio en la temperatura corporal asociado a las exposiciones a la radiación de RF en el estudio del NTP pueda causar los tipos de efectos cancerígenos que se observaron. Los resultados similares de la radiación de RF modulada por GSM en las células de Schwann realizados por el Instituto Ramazzini [22] con una TAS (SAR) de cuerpo entero mucho más baja confirman que estos efectos son independientes del calentamiento de los tejidos.

Efectos neurológicos

Aunque los límites de exposición de la FCC y la ICNIRP se basan en una supuesta dosis umbral de 4 W/kg debido a las alteraciones del comportamiento observadas a dosis más altas en ratas y monos [10, 11], numerosos estudios han mostrado déficits consistentes y reproducibles en el aprendizaje espacial y la memoria en animales de laboratorio expuestos a la radiación de RF a una TAS (SAR) inferior a 4 W/kg. Entre los ejemplos de exposiciones de estudio que demostraron estos efectos neurológicos se incluyen el GSM de 900 MHz a 0,41-0,98 W/kg, 2 horas/día durante 4 días en ratones [27]; el GSM de 900 MHz a 0,52-1,08 W/kg, 2 horas/día durante 1 mes en ratas [28]; el GSM de 900 MHz a 1,15 W/kg, 1 hora/día durante 28 días en ratas. /día durante 28 días en ratas [29]; radiación de RF pulsada de 900 MHz a 0,3-0,9 W/kg durante 6 horas/día en ratas desde la concepción hasta el nacimiento y probada a los 30 días de edad [30]; GSM de 900 MHz y UMTS de 1966 MHz a 0,4 W/kg durante 6 meses en ratas [31]; y CEM de onda continua de 900 MHz a 0,016 W/kg 3 horas/día durante 28 días en ratas [32]. Los estudios citados anteriormente no son los únicos que muestran estos efectos, pero demuestran claramente que la exposición a la radiación de RF a una TAS de 4 W/kg no es una dosis umbral para los efectos neurológicos en roedores. Los efectos de la radiación de radiofrecuencia en el aprendizaje espacial y la memoria indican que el hipocampo es un lugar objetivo de estas exposiciones. Para una lista más completa de los efectos neurológicos de la radiación de RF notificados entre 2007 y 2017, véase a Lai [33].

Además, muchos estudios han informado de cambios en las actividades eléctricas del cerebro en sujetos humanos, medidos mediante electroencefalografía (EEG), incluyendo alteraciones del sueño por exposiciones únicas a la radiación de RF de los teléfonos móviles. Esto no es sorprendente, ya que el sistema nervioso transmite mensajes basados en señales eléctricas generadas por las células nerviosas. Se ha observado una disminución de la proteína β -traza, que es una enzima clave en la síntesis de una neurohormona que promueve el sueño, en adultos jóvenes con una gran cantidad de horas acumuladas de uso del teléfono móvil [34]. Otro efecto

de la radiación de radiofrecuencia del que se ha informado con frecuencia es el aumento de la permeabilidad de la barrera hematoencefálica en ratas con SAR muy inferiores a 4 W/kg, por ejemplo [32, 35,36,37,38,39,40,41]. El estrés oxidativo inducido en el cerebro de los animales expuestos a CEM de RF se ha asociado a los efectos neurológicos observados [42]. Aunque muchos estudios no observaron cambios significativos en los efectos neurológicos en humanos y varios estudios no observaron un aumento de la permeabilidad en la barrera hematoencefálica en modelos animales [33], las diferencias en la frecuencia de los CEM, la modulación, la duración de la exposición y la dirección de las ondas que inciden en el sujeto expuesto, así como la diferencia en las propiedades dieléctricas y el tamaño y la forma del sujeto expuesto probablemente expliquen las diferencias en los efectos observados [43, 44].

Daños en el esperma

El efecto de las radiaciones de microondas no ionizantes sobre los testículos (degeneración testicular en ratones) se comunicó por primera vez hace 60 años [45]. Desde entonces, y con el rápido aumento del uso de dispositivos emisores de CEM de RF, numerosos estudios han investigado los efectos testiculares de la radiación de RF y las posibles asociaciones con la infertilidad masculina [46,47,48,49,50]. Los estudios en humanos y en animales han demostrado que el testículo es uno de los órganos más sensibles a la exposición a los CEM de RF, y que mantener un teléfono móvil en los bolsillos del pantalón en modo de conversación [modo avión desactivado] puede afectar a los parámetros de fertilidad, por ejemplo, a la motilidad de los espermatozoides, al recuento de espermatozoides, a la morfología de los mismos y a la apoptosis [48, 51]. Los meta-análisis de los estudios epidemiológicos publicados sobre el impacto de la radiación de los teléfonos móviles en la calidad del esperma de los hombres adultos han encontrado disminuciones significativas en la motilidad de los espermatozoides, la viabilidad de los espermatozoides y/o las concentraciones de espermatozoides que se asociaron con el uso del teléfono móvil [52,53,54,55]. Varios factores físicos asociados a las condiciones de exposición pueden afectar al resultado de los estudios en humanos, como la profundidad de penetración de la energía, la duración de la llamada, el tipo de tecnología de transmisión, la distancia del dispositivo al cuerpo o a los testículos y la densidad de potencia con una TAS (SAR) definida. Por ejemplo, Zilberlicht et al. [56] observaron mayores tasas de concentraciones anormales de esperma entre los hombres que sostenían sus teléfonos a menos de 50 cm de la ingle.

Los efectos de la radiación de RF sobre los parámetros reproductivos en humanos son coherentes con los resultados de los estudios experimentales en animales y los estudios in vitro. Por ejemplo, la exposición del semen humano a la radiación de 850 MHz de los teléfonos móviles durante 1 hora a una TAS (SAR) de 1,46 W/kg causó una disminución significativa de la viabilidad del esperma que se asoció con un aumento de las especies reactivas del oxígeno (ERO -ROS en inglés-) [50] o un aumento de la fragmentación del ADN del esperma [57]. La exposición de espermatozoides humanos aislados a CEM de RF de 1,8 GHz redujo significativamente la motilidad de los espermatozoides e indujo la generación de ERO (ROS) a una TAS (SAR) de 1,0 W/kg, y aumentó significativamente el daño oxidativo del ADN y la fragmentación del ADN a una TAS (SAR) de 2,8 W/kg [58].

Algunos ejemplos de los efectos de la radiación de RF sobre los factores de fertilidad masculina en estudios con animales de experimentación a TAS (SAR) inferiores a 4 W/kg incluyen: una disminución del recuento de espermatozoides y un aumento de las ERO (ROS) en ratas expuestas a frecuencias de telefonía móvil 2 h/día, durante 35 días (TAS/SAR = 0.9 W/kg) [59]; aumento del estrés oxidativo, de la 8-hidroxi-deoxiguanosina (8-OHdG) y de las roturas de la cadena de

ADN en los testículos de ratas expuestas a 900 MHz (TAS/SAR = 0,166 W/kg), 1800 MHz (0,166 W/kg) o 2100 MHz (0,174 W/kg) 2 horas al día durante 6 meses [60]; un aumento de las ERO (ROS), una disminución del recuento de espermatozoides y una alteración de la morfología del esperma en ratas expuestas a radiaciones de telefonía móvil 3G de 900 MHz (TAS/SAR = 0,26 W/kg) 2 horas/día durante 45 días [61]; disminución de la calidad de los espermatozoides en ratas en las que la exposición local del escroto a la radiación LTE de la división temporal de los teléfonos inteligentes de 2575-2635 MHz se produjo durante 1 minuto en intervalos de 10 minutos 6 horas/día durante 150 días [62]; deterioro del desarrollo testicular a los 35 días de edad en las crías macho de ratas preñadas que fueron expuestas a la radiación de RF de 2,45 GHz (SAR = 1,75 W/kg) 2 horas/día durante toda la gestación [63]; disminución de la motilidad de los espermatozoides en ratones expuestos a radiación de RF de 905 MHz (TAS/SAR = 2,2 W/kg) 12 horas/día durante 5 semanas, y aumento de la formación de las ERO (ROS) y de la fragmentación del ADN tras 1 semana de exposición [64]. Aunque también se han comunicado estudios negativos, es importante recordar que el resultado de los estudios experimentales puede verse afectado por las diferencias en las condiciones de exposición, incluyendo la frecuencia, la modulación, la polarización, los campos electromagnéticos parásitos, la TAS (SAR) local, la duración de la exposición y los métodos analíticos [43, 44].

Aunque el mecanismo de los efectos testiculares de la exposición a niveles no térmicos de radiación de RF no se conoce del todo, numerosos estudios en ratas y ratones, y en esperma humano han encontrado asociaciones entre los efectos negativos en los parámetros de fertilidad y el aumento de las ERO (ROS) y/o daños en el ADN [48, 51, 57, 58, 60, 61, 64,65,66,67,68]. Por lo tanto, es probable que los efectos adversos de la radiación de RF sobre la calidad del esperma se deban en gran parte a la generación inducida de las ERO (ROS).

Supuesto 2: *La radiación de RF es incapaz de causar daños en el ADN que no sean por calentamiento; no existe ningún mecanismo para los daños no térmicos en el ADN.*

En 2009, la ICNIRP [16] afirmó que "los fotones de baja energía de la radiación de RF son demasiado débiles para afectar a la ionización o causar un daño significativo a las moléculas biológicas como el ADN, en circunstancias ordinarias". Sin embargo, se han observado daños en el ADN y otros efectos genotóxicos en numerosos estudios de radiación de RF de baja intensidad en modelos animales y en humanos. Por ejemplo, el estudio del NTP encontró aumentos estadísticamente significativos en el daño del ADN en las células cerebrales de ratas y ratones expuestos en comparación con los controles simulados [18, 19, 69], y Akdag et al. [70] encontraron aumentos estadísticamente significativos en el daño del ADN en las células ciliadas del conducto auditivo entre hombres de 30 a 60 años de edad que utilizaron teléfonos móviles durante 10 años durante 0-30 min/día, 30-60 min/día o más de 60/min/día en comparación con personas que no utilizaron teléfonos móviles. En este último estudio, la magnitud del daño en el ADN aumentó con el incremento de la duración de la exposición diaria. En una revisión de los estudios publicados sobre los efectos genéticos de los CEM de Frecuencia Extremadamente Baja (FEB) y radiofrecuencia (RF), Lai [71] enumeró más de 150 estudios en los que las exposiciones no térmicas a radiación de RF produjeron aumentos en el daño del ADN, aberraciones cromosómicas o formación de micronúcleos.

Además, está bien establecido que el daño al ADN también puede ser causado por procesos indirectos, como la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO -ROS en inglés-), y numerosos estudios han demostrado el daño al ADN en exposiciones por debajo del presunto umbral de TAS (SAR) de 4 W/kg. Más de 120 estudios publicados han demostrado efectos oxidativos asociados a la exposición a radiación de RF de baja intensidad (archivo adicional 1:

Apéndice 1). Un análisis de estudios experimentales sobre los efectos moleculares de la radiación de RF de baja intensidad en sistemas biológicos encontró que la mayoría (93 de 100 estudios) demostraron la inducción de efectos oxidativos [72]. Estudios más recientes (de 2017) revelaron que las 30 publicaciones relevantes (100%) detectaron efectos oxidativos significativos bajo exposiciones de radiación a RF de baja intensidad, y la mayoría de estos estudios utilizaron radiación a RF modulada de dispositivos de comunicación inalámbrica.

El aumento de la producción de ERO (ROS) en las células vivas puede deberse a que los campos magnéticos débiles alteran las tasas de recombinación de los pares de radicales de vida corta generados por los procesos metabólicos normales, lo que provoca cambios en las concentraciones de radicales libres [73], o a que los CEM de frecuencia extremadamente baja (FEB) de baja intensidad provocan alteraciones en los canales iónicos activados por voltaje en las membranas celulares, lo que causa cambios en el flujo de cationes a través de las membranas [74]. Estos mecanismos se aplican tanto a los CEM de FEB como a la radiación a RF modulada por campos pulsados a frecuencias extremadamente bajas. Se han descrito otros mecanismos biofísicos por los que los CEM no térmicos pueden causar efectos biológicos a través de interacciones con procesos celulares normales [75].

El aumento de la actividad de la NADH oxidasa es otro mecanismo por el que la radiación a RF puede aumentar la producción de la ERO (ROS). Las NADH oxidasas, que son enzimas asociadas a la membrana que catalizan la reducción de un electrón del oxígeno a radical superóxido utilizando NADH como donante de electrones, han sido identificadas como mediadores primarios de las interacciones de la radiación a RF en los sistemas celulares [76]. Se midió un aumento significativo (3 veces) de la actividad de la NADH oxidasa en membranas plasmáticas purificadas de células HeLa expuestas a 875 MHz durante 5 o 10 minutos a una densidad de potencia de 200 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Esta intensidad de exposición es significativamente inferior al límite de seguridad de la ICNIRP [5].

La principal fuente de ERO (ROS) en las células vivas es la cadena de transporte de electrones mitocondrial, donde la fuga de electrones genera radicales superóxidos debido a la reducción parcial del oxígeno [77]. Se detectó un efecto dependiente de la dosis de la exposición a células HeLa modulada a 1,8 GHz (SAR = 0,15 y 1,5 W/kg) sobre la producción de ERO (ROS) mitocondriales en células germinales de ratón [65]. La exposición de embriones de codorniz a radiación de RF modulada de intensidad extremadamente baja (GSM 900 o 1800 MHz, 0,25 o 0,32 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) durante los días iniciales de la embriogénesis dio lugar a una fuerte sobreproducción de radicales superóxido y óxido de nitrógeno en las mitocondrias de las células embrionarias [78, 79]. Así pues, se han demostrado múltiples mecanismos para el aumento de la producción de ERO (ROS) por la radiación de RF de baja intensidad.

Se han publicado numerosos estudios sobre los efectos mutagénicos de los CEM de RF de baja intensidad, especialmente estudios que identificaron aumentos en los niveles de un marcador específico de daño oxidativo del ADN y un factor de riesgo para el cáncer, la 8-hidroxi-2'-deoxiguanosina (8-OHdG) [58, 60, 78,79,80,81,82,83,84]. Por ejemplo, el nivel de 8-OHdG en los espermatozoides humanos aumentó significativamente tras la exposición in vitro durante 16 horas a 1,8 GHz a un nivel de potencia de 2,8 W/kg y se correlacionó con los niveles de generación de ERO (ROS) [58]. Asimismo, la exposición de embriones de codorniz in ovo a 900 MHz modulados por GSM de 0,25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ durante 1,5, 5 o 10 días fue suficiente para producir un aumento significativo, de dos veces, de los niveles de 8-OHdG en las células embrionarias [79]. Las muestras de sangre del cordón umbilical y de tejido de la placenta obtenidas después del parto de mujeres que usaron teléfonos móviles durante el embarazo tenían niveles

significativamente más altos de parámetros de estrés oxidativo, incluyendo 8-OHdG y malondialdehído, en comparación con la sangre del cordón umbilical y el tejido de la placenta de mujeres que no usaron teléfonos móviles durante el embarazo [85]. Además, el daño al ADN, analizado mediante el ensayo cometa, aumentó significativamente en los linfocitos de la sangre del cordón umbilical obtenidos de mujeres que usaron teléfonos móviles durante el embarazo en comparación con los linfocitos de la sangre del cordón umbilical obtenidos de mujeres que no usaron teléfonos móviles.

Como la radiación de RF de baja intensidad no tiene suficiente energía para ionizar las moléculas de ADN, y como se ha documentado de forma fehaciente el aumento de la producción de ERO (ROS) en las células vivas debido a las exposiciones a CEM de RF, un efecto indirecto de este tipo de radiación es la formación de daño oxidativo en el ADN. La forma más agresiva de ERO (ROS) que puede causar daño oxidativo al ADN es el radical hidroxilo; esta especie reactiva de oxígeno puede generarse a partir del radical superóxido y del peróxido de hidrógeno [86], que pueden producirse en las células vivas expuestas a la radiación de RF de baja intensidad. La radiación ultravioleta (RUV, que abarca los rayos UVA, UVB y UVC), clasificada por la IARC como "cancerígena para los seres humanos"), también puede causar daños indirectos en el ADN al generar ERO (ROS) [87]. Así pues, tanto la radiofrecuencia RF como la RUV, que pueden inducir de forma similar el daño oxidativo del ADN, pueden aumentar el riesgo de cáncer por un mecanismo similar.

El aumento de la producción de ERO (ROS) y el agotamiento de la capacidad antioxidante en las células vivas expuestas a la radiación de RF de baja intensidad pueden dar lugar a daños oxidativos en el ADN. La inducción del estrés oxidativo, que es una característica clave de muchos carcinógenos humanos [88], incluyendo la RUV y el amianto, también puede conducir a la genotoxicidad y carcinogenicidad de la radiación de RF no ionizante sin causar daño directo al ADN.

Supuesto 3: *Dos a siete exposiciones a la radiación de RF de hasta 1 hora de duración son suficientes para excluir los efectos adversos para cualquier duración de la exposición, incluidas las exposiciones crónicas.*

Los estudios de comportamiento en 8 ratas macho y 5 monos macho que sirvieron de base para los límites de exposición a la radiación de RF adoptados por la FCC y la ICNIRP incluyeron de 2 a 7 sesiones de exposición de 40 minutos de duración para las ratas [10] y 3 sesiones de exposición de 60 minutos de duración para los monos en cada densidad de potencia [11]. Un apoyo adicional para el umbral de TAS (SAR) de 4 W/kg en el rango de frecuencias de 100 kHz a 6 GHz vino de los estudios de comportamiento realizados en ratas y monos por D'Andrea et al. [89, 90]. Sin embargo, D'Andrea et al. [91, 92] también informaron de que la exposición de ratas a una radiación de RF de onda continua de 2450 MHz durante 14 o 16 semanas provocaba diferencias significativas en la actividad conductual entre las ratas expuestas a la simulación y las expuestas a la radiación de RF con una TAS (SAR) media de 0,7 W/kg y a 1,23 W/kg, lo que indica que 4 W/kg no es un umbral de TAS (SAR) con duraciones de exposición prolongadas. Desde entonces, muchos estudios han demostrado que las respuestas a la radiación de RF no térmica dependen tanto de la intensidad como de la duración de la exposición [93]. Es importante destacar que se observó la misma respuesta con una intensidad de exposición menor, pero con una duración de exposición prolongada, así como con una intensidad de exposición más alta y una duración más corta [94].

Reconociendo que los límites de exposición no abordan los posibles efectos sobre la salud tras las exposiciones a largo plazo a la radiación de RF emitida por los dispositivos inalámbricos que experimentan las personas, la FDA [17] propuso la radiación de RF al NTP para que realizara estudios de toxicología crónica y carcinogenicidad debido a la preocupación de que "las directrices de exposición existentes se basan en la protección contra las lesiones agudas de los efectos térmicos de la exposición a la radiación de RF, y pueden no ser protectoras contra los efectos no térmicos de las exposiciones crónicas." Los efectos adversos para la salud señalados en el supuesto nº 1, incluyendo la cardiomiopatía, la carcinogenicidad, el daño espermático y los efectos neurológicos, así como los estudios de epidemiología humana que se describirán en el supuesto nº 6, se produjeron con exposiciones a la radiación de RF mucho más largas que las duraciones de exposición utilizadas en los estudios agudos en ratas [10] y monos [11]. En consecuencia, los estudios de exposición conductual aguda que sirvieron de base para los límites de exposición a la radiación de RF establecidos por la FCC y la ICNIRP son inadecuados para identificar y caracterizar los efectos adversos de la radiación de RF después de duraciones de exposición más largas. Ni los límites de exposición establecidos en los años 90 por la FCC [4] o por la ICNIRP [9], ni los reafirmados más recientemente por estos grupos [3, 5] abordan los riesgos para la salud asociados a la exposición a largo plazo a la radiación de RF.

Supuesto 4: *No se producirían efectos adicionales por la radiación de RF con la coexposición a otros agentes ambientales.*

Los actuales límites de exposición de la FCC y de la ICNIRP no tienen en cuenta los efectos interactivos de la radiación de radiofrecuencia con otros agentes ambientales, a pesar de que tales efectos han sido documentados. Las interacciones de las radiaciones de RF con otros agentes pueden dar lugar a efectos antagónicos o sinérgicos, es decir, efectos mayores que la suma de cada agente por separado.

En la evaluación de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) sobre la carcinogenicidad de los CEM de RF [44], el grupo de trabajo de expertos señaló que 4 de los 6 estudios de cocarcinogénesis disponibles en ese momento mostraban un aumento de las respuestas con la exposición a los CEM de RF. Uno de esos estudios informó de los efectos cocarcinogénicos de la radiación de RF modulada por el UMTS a 4,8 W/m² en el hígado y el pulmón de ratones que habían sido tratados con el carcinógeno etilnitrosourea (ENU) en el útero [95]; la incidencia de los cánceres de hígado y pulmón aumentó en los ratones expuestos a ENU más radiación de RF en comparación con los controles de jaula, los controles simulados y el ENU solo. Después de la evaluación del IARC, Lerchl et al. [96] reprodujeron el diseño experimental de Tillmann et al. [95] exponiendo a ratones a CEM de RF a niveles de TAS (SAR) en todo el cuerpo de 0 (simulado), 0,04, 0,4 y 2 W/kg. Se observaron aumentos significativos de adenomas de pulmón y/o carcinomas de hígado en todos los niveles de exposición. Lerchl et al. [96] concluyeron que sus "hallazgos son una indicación muy clara de que los efectos de promoción tumoral de la exposición a CEM de RF, durante toda la vida, pueden ocurrir a niveles supuestamente demasiado bajos como para causar efectos térmicos". Así, se ha demostrado la reproducibilidad de los efectos de promoción tumoral de la radiación de RF a niveles de exposición no térmicos.

Otros ejemplos de efectos sinérgicos notificados incluyen los siguientes resultados de estudios. Se observaron efectos sinérgicos sobre el daño a los linfocitos humanos con la coexposición a la radiación de RF (RF de 1,8 GHz, TAS 3 W/kg) y dos mutágenos diferentes, a saber, mitomicina C u óxido de 4-nitroquinolina [97], o con la coexposición al rayo ultravioleta C (UVC) [98]. Se encontró un efecto sinérgico sobre el daño del ADN en células sanguíneas humanas expuestas

a la radiación de 2450 MHz (5 mW/cm²) y luego expuestas a la mitomicina C [99]. Se observó un efecto de potenciación del daño en el ADN en células de mamífero cultivadas expuestas a CEM de RF de 835 MHz modulada por CDMA (TAS = 4 W/kg) y a los clastógenos ciclofosfamida o 4-nitroquinolina-1-óxido [100]. Se alteró la expresión génica en células neuronales y gliales de ratas pretratadas con lipopolisacárido, un agente neuroinflamatorio, y luego expuestas a radiación GSM modulada de 1800 MHz (TAS = 3,22 W/kg) durante 2 horas [101]. En ratas pretratadas con picrotoxina, una sustancia química que induce convulsiones, la exposición a la radiación de RF modulada por GSM de 900 MHz de los teléfonos móviles aumentó los cambios regionales en la actividad cerebral y la expresión de c-Fos [102, 103].

Los límites de exposición basados en la exposición únicamente a la radiación de radiofrecuencia darán lugar a una subestimación del verdadero riesgo y a una protección inadecuada de la salud humana en condiciones en las que las coexposiciones a otros agentes tóxicos provocan efectos adversos sinérgicos [104].

B. Factores que afectan a la dosimetría

Supuesto 5: *Los efectos sobre la salud dependen únicamente del valor de SAR promediado en el tiempo; las modulaciones de la onda portadora, la frecuencia o la pulsación no importan, excepto en la medida en que influyen en la TAS (SAR).*

Los límites de exposición a la radiación RF de la FCC y la ICNIRP se basan en la TAS (SAR) para las frecuencias de hasta 6 GHz y en las densidades de potencia para las frecuencias entre 6 GHz y 300 GHz promediadas en intervalos de 6 o 30 minutos para áreas locales y exposiciones de cuerpo entero [3, 5]. Sin embargo, la dosimetría promediada en el tiempo no capta las características únicas de la radiación RF modulada o pulsada. Por ejemplo, la modulación GSM puede incluir hasta 8 canales de voz con una duración de 0,577 mseg para cada canal. Por lo tanto, la exposición de la modulación GSM puede ser 8 veces mayor durante cada pulso de intervalo de tiempo en comparación con la exposición a una onda continua en TAS (SAR) equivalente promediada en el tiempo. Además, como se indica en el supuesto nº 14, los pulsos repetitivos de datos en ráfagas con exposiciones cortas a la 5G pueden causar picos de temperatura localizados en la piel [105]. El impacto de la radiación pulsada en las actividades biológicas a nivel molecular o celular no se tiene en cuenta con la dosimetría promediada en el tiempo.

Otra cuestión que no aborda la dosimetría promediada en el tiempo es la importancia de las modulaciones de baja frecuencia en los sistemas biológicos. Como se ha comentado en el supuesto nº 2, se ha demostrado una mayor producción de ERO (ROS) en las células vivas y daños en el ADN con la exposición a modulaciones de baja frecuencia de las ondas portadoras de radiofrecuencia [106]. Los límites de exposición basados en la dosimetría de TAS (SAR) promediada en el tiempo o en la densidad de potencia, sin tener en cuenta el impacto de las modulaciones de amplitud o frecuencia, no abordan adecuadamente los posibles efectos sobre la salud de las exposiciones a la radiación de RF en el mundo real. Existen numerosas pruebas de que diversos efectos de la exposición a la radiación de RF dependen de las modulaciones de la onda portadora, la frecuencia o la pulsación [43, 107, 108]. A diferencia de la ICNIRP y la FCC, la monografía de la IARC sobre la carcinogenicidad de la radiación de RF señaló que los efectos de la radiación de RF pueden verse influidos por características de la exposición como la duración de la misma, la frecuencia de la portadora, el tipo de modulación, la polarización, la intermitencia de la exposición y los campos electromagnéticos de fondo [44].

C. Riesgo de tumores cerebrales en humanos

Supuesto 6: *Los múltiples estudios en humanos que encuentran asociaciones entre la exposición a la radiación de radiofrecuencia de los teléfonos celulares y el aumento del riesgo de tumores cerebrales son defectuosos debido a los sesgos de los estudios de casos y controles publicados, y porque las tasas de cáncer cerebral se han mantenido estables desde que se generalizó el uso de dispositivos de comunicación inalámbricos.*

Aunque se ha afirmado que "los límites actuales para los teléfonos celulares son aceptables para proteger la salud pública" porque "incluso con el uso diario frecuente por parte de la gran mayoría de los adultos, no hemos visto un aumento de eventos como los tumores cerebrales" [109], la base de datos del SEER (Programa de Vigilancia, Epidemiología y Resultados Finales del Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU.) muestra una disminución anual del 0,3% para todos los tumores cerebrales, pero un aumento del 0,3% por año para el glioblastoma en los Estados Unidos entre 2000 y 2018 (<https://seer.cancer.gov/explorer/>). Lo más preocupante fue que el aumento anual para el glioblastoma fue del 2,7% por año para las personas menores de 20 años. Además, Zada et al. [110] informaron de que la incidencia del glioblastoma multiforme (GBM) en el lóbulo frontal, el lóbulo temporal y el cerebelo aumentó en EE. UU. entre 1992 y 2006, y Philips et al. [111] informaron igualmente de un aumento estadísticamente significativo de la incidencia del GBM en los lóbulos frontal y temporal del cerebro en el Reino Unido durante 1995-2015. En Suecia, las tasas de tumores cerebrales en el Registro Nacional Sueco de Pacientes Internos y el Registro Sueco de Cáncer aumentaron de 1998 a 2015 [112]. Además, hay que tener en cuenta que la exposición acumulada, el uso del lado de la cabeza y la latencia para la formación de tumores por radiación de RF no se recogen completamente en los registros nacionales de cáncer. Por lo tanto, la afirmación de que las tendencias de las tasas de incidencia del cáncer cerebral no han aumentado desde la introducción de los teléfonos móviles es errónea y engañosa. La especificidad del efecto debe tenerse en cuenta en estos análisis de tendencias.

Los estudios de control de casos, que utilizan métodos científicos sólidos, han encontrado sistemáticamente un mayor riesgo de tumores cerebrales de tipo glioma y neuroma acústico con el uso intensivo de teléfonos móviles a largo plazo. Esta asociación fue evaluada en la IARC en 2011 por 30 participantes expertos que concluyeron que la radiación de radiofrecuencia (RF) es un "posible" carcinógeno humano [44]. Por el contrario, el muy citado estudio de cohorte danés sobre "usuarios de teléfonos móviles" [113] fue desestimado por la IARC debido a graves deficiencias metodológicas en el diseño del estudio, incluidas las clasificaciones erróneas de la exposición [44, 114].

Los resultados de los meta-análisis del riesgo de glioma y neuroma acústico de los estudios suecos de casos y controles realizados por Hardell y colaboradores [115, 116], el estudio Interphone de 13 países [117] y el estudio francés de Coureau et al. [118] se muestran en la Tabla 1 como *odds ratios* (OR) -razón de probabilidades, en castellano- con intervalos de confianza del 95%. Para el glioma en cualquier localización de la cabeza, se encontró un aumento estadísticamente significativo de casi dos veces, mientras que para el uso ipsilateral del teléfono móvil (tumor y uso del teléfono en el mismo lado de la cabeza) el riesgo se incrementó en 2,5 veces. Estas OR se basan en los grupos de cada estudio con la categoría más alta de tiempo de llamada acumulado, que fueron ≥ 1.640 horas en el estudio de Interphone [117, 119] y los estudios suecos [115, 116], y ≥ 896 horas en el estudio de Coureau et al. [118]. La disminución de la supervivencia entre los casos de glioma, especialmente el astrocitoma de grado IV, se asoció con el uso prolongado y altamente acumulado de teléfonos inalámbricos [120]. El aumento del riesgo de expresión del gen p53 de tipo mutante en la zona periférica del

astrocitoma de grado IV se asoció con el uso de teléfonos móviles durante ≥ 3 horas al día. El aumento de esta mutación se correlacionó significativamente con un menor tiempo de supervivencia global [121].

Table 1 Odds ratios (OR) with 95% confidence interval (CI) for glioma and acoustic neuroma in case-control studies in the highest category for cumulative mobile phone use in hours^a

From: [Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G](#)

	Glioma				Acoustic neuroma			
	All		Ipsilateral		All		Ipsilateral	
	OR	95% CI	OR	95% CI	OR	95% CI	OR	95% CI
Interphone [117, 119] Cumulative use ≥ 1640 hr	1.40	1.03–1.89	1.96	1.22–3.16	1.32	0.88–1.97	2.33	1.23–4.40
Coureau et al. [118] Cum use ≥ 896 hr	2.89	1.41–5.93	2.11	0.73–6.08				
Hardell et al. [115, 116] Cumulative use ≥ 1640 hr	2.13	1.61–2.82	3.11	2.18–4.44	2.40	1.39–4.16	3.18	1.65–6.12
Meta-analysis longest cumulative use	1.90	1.31–2.76	2.54	1.83–3.52	1.73	0.96–3.09	2.71	1.72–4.28

^a Note Hardell et al. [115, 116] also assessed use of cordless phones

Para el neuroma acústico, el riesgo aumentó significativamente con la exposición acumulada y el uso ipsilateral en 2,7 veces. Se utilizó un modelo de efectos aleatorios, basado en una prueba de heterogeneidad, para los metaanálisis de estos estudios publicados. El volumen tumoral del neuroma acústico aumentó por cada 100 horas de uso acumulativo de teléfonos inalámbricos en el estudio sueco y por los años de latencia, lo que indica la promoción del tumor [115].

Otros estudios de casos y controles sobre el uso de teléfonos móviles también informaron de un mayor riesgo de neuroma acústico [122,123,124]. Esos estudios no se incluyeron en el metanálisis porque no se facilitaron datos sobre el uso acumulado del teléfono móvil con el número de casos y controles o porque había otras deficiencias. También cabe destacar que los riesgos de tumores aumentaron en subconjuntos del estudio Interphone; por ejemplo, hubo un aumento de casi 2 veces en el riesgo de neuroma acústico para ≥ 10 años y uso ipsilateral entre los países del norte de Europa que participaron en el estudio Interphone [125].

Se ha afirmado que las asociaciones entre los aumentos del riesgo de cáncer cerebral y la exposición a la radiación de radiofrecuencia de los teléfonos móviles en los estudios de casos y controles publicados pueden ser atribuibles a sesgos de recuerdo y/o selección [5, 109]. Sin embargo, un nuevo análisis de los datos canadienses que se incluyeron en el estudio Interphone mostró que no había ningún efecto sobre el riesgo de glioma después de realizar ajustes por los sesgos de selección y recuerdo [126]. Las odds ratios (OR) para el glioma aumentaron significativamente y en una medida similar cuando se comparó el cuartil más alto de uso con los que no eran usuarios habituales, se hicieran o no ajustes por sesgos. Además, Hardell y Carlberg [116] mostraron que el riesgo de glioma con el uso del teléfono móvil aumentaba significativamente incluso cuando se comparaba con el riesgo de meningioma. Dado que el riesgo de meningioma no aumentaba significativamente, esta respuesta tumoral no podía atribuirse al sesgo de recuerdo. Claramente, los sesgos de selección y recuerdo no explican el elevado riesgo de tumor cerebral asociado al uso de teléfonos móviles. Así pues, las pruebas epidemiológicas contradicen los dictámenes de la FCC y la ICNIRP sobre el riesgo de tumores cerebrales por la radiación de radiofrecuencia.

También hay que tener en cuenta que la glándula tiroides es un órgano objetivo de la radiación de RF de los teléfonos inteligentes. Un estudio de casos y controles sobre el uso de teléfonos

móviles sugirió un mayor riesgo de microcarcinoma de tiroides asociado al uso prolongado de teléfonos móviles [127]. Se utilizó ADN de linfocitos periféricos obtenido de casos y controles para estudiar las interacciones genotipo-ambiente. El estudio demostró que varias variantes genéticas basadas en polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) aumentaban el riesgo de cáncer de tiroides con el uso del teléfono móvil [128]. También se ha informado del aumento de la incidencia del cáncer de tiroides en los países nórdicos, especialmente en las dos últimas décadas [129, 130]. Además, en un reciente estudio de casos y controles se encontró un aumento significativo del riesgo de cáncer de mama entre las mujeres taiwanesas en función del uso de teléfonos inteligentes y de la distancia entre la mama y la colocación del teléfono inteligente [131].

D. Variaciones individuales en la exposición y la sensibilidad a los CEM de RF

Supuesto 7: *No hay diferencias entre los individuos, incluidas niñas y niños, en cuanto a la absorción de CEM de RF y la susceptibilidad a esta radiación.*

Se han demostrado y documentado ampliamente las diferencias entre niñas y niños con las personas adultas en cuanto a la absorción de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia cuando los teléfonos móviles funcionan cerca de la cabeza [132,133,134,135,136,137]. Los principales factores que explican estas tasas de absorción disímiles incluyen diferencias en la anatomía, las propiedades dieléctricas de los tejidos y la fisiología. Mediante simulaciones en el Dominio del Tiempo por Diferencia Finita (FDTD, en sus siglas en inglés), empleando modelos antropomórficos computacionales detallados, es posible encontrar diferencias relacionadas con la anatomía y con las dimensiones de la cabeza.

Dado que la penetración de los CEM en los tejidos humanos puede ser del orden de unos pocos centímetros, dependiendo de la longitud de onda, es evidente que los tejidos internos del cerebro recibirán una dosis significativamente mayor en las cabezas más pequeñas de niñas y niños en comparación con las de las personas adultas, a pesar de que la absorción total y la TAS espacial máxima (psSAR, en su acrónimo en inglés) calculados en toda la cabeza varían en cantidades menores [132, 133, 138]. Fernández et al. [136] estimaron que la psSAR de la radiación de los teléfonos móviles en el hipocampo era 30 veces mayor en niñas y niños en comparación con las personas adultas, mientras que la psSAR en los ojos era 5 veces mayor en niñas y niños; estas diferencias se debían en gran medida a la mayor proximidad a las antenas de los teléfonos móviles. Las dimensiones más finas de los cráneos de niñas y niños también contribuyen a esta diferencia [135], lo que hace que la psSAR sea unas 2 veces mayor en los cerebros de niñas y niños [134,135,136,137, 139] en comparación con las personas adultas.

Además, los tejidos de los mamíferos jóvenes tienen una mayor conductividad y permitividad eléctrica que los de los animales maduros [140]. Esto también contribuye a una mayor penetración y absorción de los CEM, lo que resulta en un mayor aumento de la psSAR. Se calcula que la psSAR en la médula ósea del cráneo de niñas y niños se multiplica por 10 debido a la mayor conductividad de este tejido [137]. La distancia entre el dispositivo móvil y los tejidos del cuerpo es importante para caracterizar la dosimetría de los tejidos. La Agencia Nacional ANFR de Francia publicó recientemente los datos de las pruebas de la TAS (SAR) de 450 teléfonos móviles. Los psSAR de diez gramos aumentaron en un 10-30% por cada milímetro de colocación proximal del teléfono celular al cuerpo fantasma planar (<http://data.anfr.fr/explore/dataset/das-telephonie-mobile/?disjunctive.marque&disjunctive.modele&sort=marque>).

Por último, es importante señalar que las simulaciones de la dosimetría de los tejidos sólo tienen en cuenta los parámetros físicos de los tejidos; no consideran los procesos biológicos que ocurren en los tejidos vivos. Mientras niñas y niños están creciendo, los órganos y sistemas multiorgánicos en desarrollo son más susceptibles a los efectos adversos de los agentes ambientales; las simulaciones en el dominio del tiempo por diferencia finita (DFDT -FDTD en inglés-) no tienen en cuenta las diferencias en la susceptibilidad de los órganos o sistemas para las exposiciones que se producen durante el desarrollo infantil.

Supuesto 8: *No hay diferencias entre los individuos en cuanto a su sensibilidad a los efectos de la radiación de RF sobre la salud.*

Toda la vida es "electrosensible" en cierta medida, ya que los procesos fisiológicos dependen de interacciones electromagnéticas tanto sutiles como sustanciales en todos los niveles, desde el molecular hasta el sistémico. Las respuestas a múltiples tipos de exposición electromagnética revelan que existe una gama mucho más amplia de sensibilidad a los CEM de lo que se suponía anteriormente, y que existen subgrupos de sujetos extremadamente hipersensibles [141,142,143,144,145,146,147,148,149,150,151]. Dados los efectos adversos para la salud señalados en el supuesto nº 1, incluyendo la cardiomiopatía, la carcinogenicidad y los efectos neurológicos, los síntomas agudos y conscientes que se manifiestan en algunos individuos no deberían ser inesperados. El término que se utiliza actualmente y con mayor frecuencia dentro de la profesión médica para describir a aquellos que son aguda y sintomáticamente sensibles a las exposiciones a la radiación no ionizante es Hipersensibilidad Electromagnética (EHS).

La EHS es una respuesta física multisistémica caracterizada por la sensibilización y/o los síntomas desencadenados por las exposiciones a los CEM. Los síntomas comunes incluyen (pero no se limitan a) dolores de cabeza, mareos, alteraciones del sueño, palpitaciones, tinnitus, erupciones cutáneas, alteraciones visuales, alteraciones sensoriales y alteraciones del estado de ánimo [152, 153]. Estos síntomas se notifican en respuesta incluso a CEM de intensidad extremadamente baja (órdenes de magnitud por debajo de los niveles de seguridad actuales) de múltiples tipos (en términos de frecuencia, intensidad y formas de onda). Los desencadenantes más comunes de los síntomas frecuentes y persistentes de EHS son las emisiones de RF moduladas por pulsos, moduladas a frecuencias extremadamente bajas. Entre las fuentes desencadenantes más comunes se encuentran los teléfonos móviles, los teléfonos fijos inalámbricos DECT, los ordenadores con Wi-Fi/Bluetooth, los routers Wi-Fi, los contadores inteligentes, las antenas de estaciones base y los artículos eléctricos domésticos. Evitar o mitigar los CEM es la forma más eficaz de reducir los síntomas [154].

Las directrices para el diagnóstico y el tratamiento de la EHS también han sido revisadas por expertos y coinciden en que el pilar del tratamiento médico es evitar los campos electromagnéticos antropogénicos [152, 155, 156]. También se han publicado historias de casos que detallan las presentaciones clínicas, las mediciones de CEM y la mitigación [157], y se siguen explorando los biomarcadores, incluidos los marcadores elevados de estrés oxidativo, los marcadores inflamatorios y los cambios en el flujo sanguíneo cerebral [152].

Se ha demostrado que la EHS es una respuesta física en condiciones ciegas [145, 151, 158, 159] y, además de estos estudios, se han observado cambios agudos inducidos por los CEM en la cognición, el comportamiento y las reacciones fisiológicas en estudios con animales [27, 30, 160,161,162,163,164,165,166,167,168,169,170,171,172]; además de otras referencias en el supuesto nº 13, que no pueden estar sesgadas por los miedos cultivados por los medios de

comunicación. Estos estudios proporcionan más pruebas que invalidan la respuesta nocebo (síntomas físicos inducidos por el miedo) como causal respecto a los síntomas.

No se debe esperar que todos los estudios de provocación demuestren de forma fiable las reacciones adversas; sin embargo, las sugerencias de que la respuesta nocebo puede causar síntomas de EHS se alegaron a partir de estudios de provocación que no mostraron una relación entre la exposición a los CEM y los síntomas reportados [173]. Los fracasos de estos estudios son explicables dada la muy pobre metodología en la mayoría de ellos. No se tuvo en cuenta una multitud de factores esenciales que deben adaptarse al individuo, como la aparición y el desplazamiento variable de los síntomas, la necesidad de períodos de lavado adecuados [Nota del traductor: Los *períodos de lavado* son los *períodos* entre la administración/exposición a un tratamiento], la especificidad de las frecuencias e intensidades de activación, el requisito de una higiene completa de los CEM durante las exposiciones simuladas, el requisito de exposiciones similares a las de la vida (por ejemplo, ondas portadoras de información moduladas por impulsos), etc. Por ejemplo, se ha demostrado que varios canales de frecuencia de los teléfonos móviles GSM/UMTS afectan a las mismas células humanas de forma diferente [174,175,176,177]. Del mismo modo, se ha demostrado que la EHS depende de la frecuencia [151]. Como se ha señalado anteriormente, los estudios de provocación significativos deben tener en cuenta múltiples parámetros físicos de la exposición, incluyendo la frecuencia, la modulación, la duración de la exposición y el tiempo después de la exposición [155]; sin embargo, la mayoría de los estudios de provocación que no han logrado establecer una conexión causal entre la exposición a las radiaciones de RF y los síntomas de la EHS [173] utilizaron sólo una o dos condiciones con exposiciones a corto plazo.

La respuesta nocebo como causa de la EHS presenta muchos problemas, entre los que destaca la ausencia del vínculo temporal necesario. Para que la respuesta nocebo sea la causa de la EHS, la conciencia y la preocupación por los impactos negativos sobre la salud de los CEM deben preceder a los síntomas. Sin embargo, en la mayoría de las personas con EHS esto no es así [178]. A medida que mejore la comunicación pública de los riesgos, esto dejará de ser verificable; sin embargo, esto se ha observado de forma importante en el único momento en que podría haberlo sido: antes de la concienciación generalizada de los perjuicios para la salud de las radiaciones no ionizantes (RNI – NIR en inglés-).

Aunque reconoce que algunos grupos vulnerables pueden ser más susceptibles a los efectos de la exposición a las RNI, la ICNIRP [179] reconoció que sus directrices pueden no tener en cuenta de forma segura a estos subgrupos sensibles:

"Los diferentes grupos de una población pueden tener diferencias en su capacidad de tolerar una determinada exposición a las RNI [radiaciones no ionizantes]. Por ejemplo, los niños, los ancianos y algunos enfermos crónicos pueden tener una menor tolerancia a una o más formas de exposición a las RNI que el resto de la población. En tales circunstancias, puede ser útil o necesario desarrollar niveles de directrices separados para diferentes grupos dentro de la población general, pero puede ser más eficaz ajustar las directrices para la población general para incluir a dichos grupos. Es posible que algunas directrices sigan sin proporcionar una protección adecuada a ciertos individuos sensibles ni a individuos normales expuestos concomitantemente a otros agentes, que pueden exacerbar el efecto de la exposición a los RNI, siendo un ejemplo los individuos con fotosensibilidad".

En 2020, la ICNIRP [23] también señaló que los efectos biológicos no son fácilmente discernibles de los efectos adversos para la salud, y que sus directrices

"...no pretenden proteger contra los efectos biológicos como tales (cuando los mecanismos de compensación se ven desbordados o agotados), a menos que haya también un efecto adverso para la salud asociado. Sin embargo, no siempre es fácil establecer una distinción clara entre los efectos biológicos y los efectos adversos para la salud, y de hecho esto puede variar dependiendo de la susceptibilidad individual a situaciones específicas. Un ejemplo son los efectos sensoriales de las exposiciones a las radiaciones no ionizantes en determinadas circunstancias, como la sensación de hormigueo resultante de la estimulación de los nervios periféricos por campos eléctricos o magnéticos; los magnetofósforos (sensaciones de parpadeo de la luz en la periferia del campo visual) resultantes de la estimulación de la retina por campos eléctricos inducidos por la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia; y la audición por microondas resultante de las ondas termoelásticas debidas a la expansión de los tejidos blandos de la cabeza que viajan por conducción ósea hasta el oído interno. Estas percepciones pueden provocar a veces molestias e incomodidad. La ICNIRP no considera que la incomodidad y la molestia sean efectos adversos para la salud por sí mismas, pero, en algunos casos, la molestia puede conducir a efectos adversos para la salud al comprometer el bienestar. Las circunstancias de exposición en las que se producen el malestar y la molestia varían según los individuos".

Trivializar el "malestar", que es el precursor del dolor, no está en consonancia con las recomendaciones de la OMS citadas por el mismo documento de la ICNIRP [23]: "La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades".

El malestar es una señal de que un organismo está experimentando algo que compromete la salud óptima y, aunque en algunos casos puede ser trivial y reversible, en otros puede no serlo. Existe una gama extremadamente amplia tanto de tolerancia al dolor como de percepción del mismo entre los seres humanos, y para lograr una atención sanitaria preventiva significativa, el "malestar" debe tomarse en serio y mitigarse siempre que sea posible. Esto es especialmente cierto en este caso, en el que se están notificando síntomas como dolores de cabeza en respuesta a la exposición a los teléfonos móviles, al mismo tiempo que se observa un mayor riesgo de tumores cerebrales debido a esas mismas exposiciones (véase el supuesto 6).

En realidad, las personas con EHS informan de alteraciones de la salud mucho más graves que el "malestar" o la "molestia" y, en algunos casos, estos síntomas son incapacitantes [180, 181]. Los tribunales nacionales de Francia, Suecia y España reconocen cada vez más la EHS como una discapacidad, lo que amplía la exigencia de directrices de seguridad que se adapten deliberadamente a este grupo más susceptible [180].

E. Factores de seguridad de los CEM de RF aplicados a las personas trabajadoras y a la población en general

Supuesto 9: *Un factor de seguridad de 50 veces para la exposición de todo el cuerpo a la radiación de RF es adecuado para proteger a la población general de cualquier riesgo para la salud derivado de la radiación de RF.*

Los organismos de salud pública de EE.UU. y de todo el mundo aplican múltiples factores de incertidumbre a los datos sobre efectos en la salud para establecer niveles de exposición que se consideran seguros para la gran mayoría de las poblaciones expuestas [182,183,184]. Aunque las directrices para el uso de los factores de incertidumbre se desarrollaron para las sustancias

químicas, también son pertinentes para otros agentes tóxicos, como la radiación de RF. Los factores de incertidumbre necesarios para los efectos tóxicos de la radiación de RF basados en estudios que demuestran un nivel de efecto adverso no observado (NOAEL, en su acrónimo en inglés) en animales de experimentación incluyen:

1) Extrapolación de animales a humanos. Cuando los datos se basan en estudios en animales de experimentación, se aplica un factor de 3 a 10 (para las posibles diferencias de las especies en la dosimetría y la respuesta de los tejidos), a menos que haya datos convincentes que demuestren una sensibilidad equivalente en animales y humanos. Sin embargo, no hay pruebas que demuestren que los seres humanos sean igual o menos sensibles a la radiación de RF que los animales que se utilizaron en los estudios a partir de los cuales la FCC y la ICNIRP establecieron los límites de exposición.

2) Ajuste para la variabilidad humana. Se utiliza un segundo factor de 10 para tener en cuenta la variabilidad interindividual en la susceptibilidad (por ejemplo, debido a diferencias de edad, sexo, variación genética, enfermedades preexistentes) al agente tóxico entre la población general. Se ha reconocido que un factor de 10 para la variabilidad humana es probablemente inadecuado para las subpoblaciones sensibles y puede requerir un ajuste adicional.

3) Extrapolación de los estudios a corto plazo a la exposición de por vida. Se aplica un factor adicional de 10 para los estudios a corto plazo, como los utilizados para establecer los límites de exposición a la radiación de radiofrecuencia, con el fin de proporcionar una protección de por vida frente a la exposición crónica. Esto es especialmente importante si se tienen en cuenta los periodos notablemente cortos en los que se evaluó originalmente la toxicidad de la radiación de RF [10, 11].

4) Insuficiencias de la base de datos. Por último, se aplica un factor de incertidumbre de 3 a 10 por insuficiencia de la base de datos, es decir, por caracterización incompleta de la toxicidad de un agente. Los estudios de comportamiento [10, 11] que se utilizaron para establecer los límites de exposición a la radiación de RF de la FCC y la ICNIRP no proporcionan una caracterización completa de los efectos de este tipo de radiación ni identificaron el efecto adverso más sensible de las exposiciones a la radiación de RF.

Basar los límites de exposición a la radiación de RF en los estudios de comportamiento en ratas y monos [10, 11, 90, 91] requeriría la aplicación de un factor de incertidumbre compuesto de entre 900 y 10.000 para ser coherente con los enfoques utilizados por los organismos de salud pública para establecer límites de exposición protectores para los trabajadores y la población en general. Basándose en el tamaño del factor de incertidumbre/seguridad necesario, los conjuntos de datos utilizados por la FCC y la ICNIRP son claramente inadecuados para establecer límites de exposición a las RF con una confianza razonable. Los factores de seguridad seleccionados arbitrariamente por la FCC y la ICNIRP, de 10 para los trabajadores y 50 para la población en general, son lamentablemente inadecuados para proteger a las poblaciones expuestas.

Cuando los factores de incertidumbre/seguridad se aplican a un valor umbral de exposición erróneo para los efectos adversos, el nivel resultante no garantiza la protección de la salud de la población general expuesta a ese agente. Los estudios citados anteriormente [18, 22, 91, 92, 96] muestran que la TAR (SAR) de cuerpo entero de 4 W/kg no es un nivel umbral para los efectos adversos causados por la radiación de RF. En un reciente análisis cuantitativo de varios efectos adversos para la salud del estudio del NTP, Uche y Naidenko [185] mostraron que la TAR (SAR) de cuerpo entero permisible de 0,08 W/kg (basado en una reducción de 50 veces de la TAR (SAR)

umbral asumido de 4 W/kg) era de 20 a 40 veces mayor que los valores de la TAR (SAR) de protección de la salud derivados de la modelización de dosis de referencia de los datos del NTP para la cardiomiopatía (tras la aplicación de factores de seguridad de 10 veces para la variabilidad entre especies e intraespecies). Los enfoques utilizados por estos autores son coherentes con las metodologías recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para cuantificar los riesgos para la salud de los agentes ambientales tóxicos y cancerígenos [1, 182]. Por lo tanto, una reducción de 50 veces del supuesto umbral de SAR de cuerpo entero de 4 W/kg es inadecuada para proteger la salud de la población general de la exposición a la radiación de RF.

Supuesto 10: *Un factor de seguridad de 10 veces para la exposición de todo el cuerpo a la radiación RF es adecuado para proteger a los trabajadores de cualquier riesgo para la salud derivado de la radiación RF.*

Cuando se aplicaron los límites de exposición a la radiación de RF en 1997, la justificación de la diferencia entre los factores de seguridad para la población general (50 veces) y para las personas trabajadoras (10 veces) se basó en "los periodos de exposición de las dos poblaciones, redondeados a un dígito (40 horas de trabajo por semana/168 horas por semana = ~0,2)". [6]. Además de las diferencias en los periodos de exposición entre los trabajadores y la población general, la ICNIRP racionaliza la conveniencia del factor de seguridad más bajo para las personas trabajadoras porque "los individuos ocupacionalmente expuestos pueden considerarse un grupo más homogéneo que la población general", son, "en general, adultos relativamente sanos dentro de un rango de edad limitado", y "los individuos ocupacionalmente expuestos deben operar bajo condiciones controladas y estar informados sobre los riesgos asociados a la exposición a la radiación no ionizante para su situación específica y cómo reducir estos riesgos" [23]. Por el contrario, "el público en general, en la mayoría de los casos, no es consciente de su exposición a las radiaciones no ionizantes y, sin educación, no se puede esperar razonablemente que tome precauciones para minimizar o evitar cualquier efecto adverso de la exposición".

La suposición de que las personas trabajadoras están formadas para comprender los riesgos para la salud asociados a la exposición a la radiación de RF y para mitigar esos riesgos en el mayor grado posible no es correcta, ya que ni la FCC ni las directrices de la ICNIRP reconocen ningún efecto sobre la salud de la radiación de RF a una TAS (SAR) inferior a 4 W/kg, y los límites de exposición autorizados por la FCC y la ICNIRP no consideran los efectos sobre la salud de las exposiciones a largo plazo [3, 5]. El único efecto sobre la salud que abordan la FCC y la ICNIRP es el daño tisular debido al calentamiento excesivo de las exposiciones agudas. Por lo tanto, la reducción de 10 veces del umbral de la TAS (SAR) en todo el cuerpo calculada a partir de estudios de comportamiento agudo en ratas y monos es inadecuada para proteger la salud de los trabajadores expuestos a largo plazo a la radiación de RF (véanse los comentarios del supuesto nº 9). No hay datos que demuestren la idoneidad de este factor de seguridad/incertidumbre elegido arbitrariamente para las personas trabajadoras expuestas en el trabajo, mientras que, por el contrario, se han asociado riesgos excesivos de cáncer a la exposición de las personas trabajadoras a la radiación de RF que operan sistemas de radar y comunicación en entornos militares y laborales [186].

Supuesto 11: *La exposición de cualquier gramo de tejido, considerado en forma de cubo, hasta 1,6 W/kg, o de 10 g de tejido, considerado en forma de cubo, hasta 2 W/kg, (duración no especificada) no aumentará el riesgo de ese tejido a ningún efecto tóxico o cancerígeno en la población general.*

La dosimetría de los tejidos se analizó en el estudio del NTP sobre la radiación de radiofrecuencia de los teléfonos móviles en ratas y ratones [187]. En las ratas, las exposiciones de todo el cuerpo durante los ciclos de 10 minutos de encendido fueron de 1,5, 3,0 o 6,0 W/kg, y las TAS (SAR) del cerebro y del corazón variaron de las TAS (SAR) de todo el cuerpo entre un 7% y menos de 2 veces para el cerebro y el corazón, respectivamente. Se necesita una evaluación cuantitativa del riesgo de los datos de incidencia de tumores del NTP para evaluar el riesgo de cáncer en órganos específicos. La nominación de la FDA [19] al NTP reconoció la necesidad de "grandes experimentos con animales bien planificados para proporcionar la base para evaluar el riesgo para la salud humana de los dispositivos de comunicaciones inalámbricas". Sin embargo, más de 3 años después de que una revisión externa de los estudios del NTP encontrara "claras evidencias de actividad cancerígena", la FDA [109] ha seguido restando importancia a estos hallazgos y evitando realizar una evaluación cuantitativa del riesgo de los datos tumorales que ellos (la FDA) solicitaron en un principio. En contraste con la FDA, Uche y Naidenko [185] analizaron los datos del NTP sobre la cardiomiopatía mediante un enfoque de dosis de referencia y descubrieron que el nivel de riesgo extra del 10% para este efecto estaba en el rango de un SAR de cuerpo entero de 0,2 a 0,4 W/kg. Por lo tanto, existe un mayor riesgo (superior al 10%) de desarrollar una cardiomiopatía con TAS (SAR) de tejidos locales inferiores a 1,6 o 2,0 W/kg.

La tasa de absorción específica espacial máxima (psSAR), tal como la utilizan la ICNIRP y la FCC, es una dosimetría inadecuada de la radiación de radiofrecuencia a frecuencias superiores a 1 GHz. El psSAR se calcula promediando volúmenes cúbicos fijos que contienen una cantidad determinada de masa, y supone un material homogéneo con una densidad de masa determinada. La recomendación de la ICNIRP es promediar volúmenes cúbicos que contengan 10 g de tejido (10 g-psSAR), mientras que la recomendación de la FCC es promediar volúmenes cúbicos que contengan 1 g de tejido (1 g-psSAR). Las recomendaciones actuales limitan el uso de psSAR a frecuencias de hasta 6 GHz [3, 5].

En el archivo adicional 2: Apéndice 2, se muestra una evaluación de la utilidad de utilizar psSAR como parámetro dosimétrico a diferentes frecuencias que van desde 100 MHz a 26 GHz y con tamaños de cubos que van desde 10 mg a 10 g. Para los cubos más pequeños y las frecuencias más bajas, el promedio en el cubo no subestima el valor máximo en la superficie del cubo, pero a frecuencias más altas el psSAR promediado en cubos más grandes puede ser varias veces menor que el psSAR promediado en cubos más pequeños. Por ejemplo, a 2,45 GHz, el promedio sobre un cubo de 10 g subestima en 4 dB (aproximadamente 2,5 veces) el psSAR promediado en cubos más pequeños, mientras que, para 5,8 GHz, el promedio sobre un cubo de 10 g subestima el psSAR en 12 dB (aproximadamente 16 veces) en comparación con el promedio en un cubo de 10 mg, y en 6 dB (aproximadamente 4 veces) en comparación con el promedio sobre un cubo de 1 g. Cuando se aumenta la frecuencia, la subestimación del psSAR promediado en cubos más grandes (por ejemplo, 10 g o 1 g) en comparación con cubos más pequeños (por ejemplo, 100 mg y 10 mg) se hace más pronunciada. Considerando el cubo de 10 g, la diferencia entre el psSAR para el CEM de 5,8 GHz comparado con el CEM de 0,9 GHz es de unos 7 dB (o una subestimación de aproximadamente 5 veces). Estas grandes diferencias se deben a la menor penetración de los CEM en las frecuencias más altas. Por lo tanto, las recomendaciones de la ICNIRP de 10 g-psSAR y de la FCC de 1 g-psSAR no proporcionan parámetros dosimétricos fiables para evaluar la absorción de CEM por encima de 1 GHz.

La TAS (SAR) promediada sobre un cubo de 10 g también es defectuoso para evaluar la carcinogenicidad porque es un volumen demasiado grande para centrarse en las células madre y su importante papel en la carcinogénesis. Las células madre humanas fueron más sensibles a

las exposiciones a la radiación de RF de los teléfonos móviles GSM y UMTS que los linfocitos y los fibroblastos [175]. En lugar de una distribución aleatoria de objetivos para la carcinogénesis, se necesita una distribución localizada de la TAS (SAR) en volúmenes más pequeños para caracterizar con mayor precisión las relaciones entre la TAS (SAR) y la inducción de tumores. Desde el punto de vista de la organización de las células madre, el volumen de las determinaciones de SAR puede ser especialmente importante para establecer límites de seguridad para los niños, porque la mayoría de las células madre y sus nichos son espacial y temporalmente transitorios durante el desarrollo del cerebro [188].

Supuesto 12: *La exposición de cualquier gramo de tejido en forma de cubo hasta 8 W/kg, o de 10 g de tejido en forma de cubo hasta 10 W/kg, (duración no especificada) no aumentará el riesgo de ese tejido a ningún efecto tóxico o cancerígeno en los trabajadores.*

Sobre la base de los análisis de la dosimetría tisular en el estudio del NTP [187], se observaron efectos tóxicos y carcinogénicos específicos de órganos en ratas con TAS (SAR) tisulares locales muy inferiores a 8 o 10 W/kg [18]. La dosimetría tisular del estudio del NTP y la inadecuación de la TAS (SAR) local especificada por la ICNIRP y la FCC se describen en el supuesto nº 9.

F. Exposición ambiental a la radiación de RF

Supuesto 13: *No hay preocupación por los efectos ambientales de la radiación de RF ni por los efectos en la fauna silvestre o los animales domésticos.*

Aunque los niveles de fondo de CEM de RF están aumentando en el medio ambiente, incluidas las zonas rurales remotas [189], ni la FCC ni la ICNIRP tienen en cuenta los efectos de esta radiación en la fauna silvestre. El constante movimiento de la mayoría de las especies silvestres dentro y fuera de los CEM artificiales variables puede dar lugar a altas exposiciones cerca de las estructuras de comunicación, especialmente para las especies voladoras como las aves y los insectos. Existe una cantidad considerable de literatura científica sobre los efectos perturbadores de las radiaciones de RF en la fauna silvestre (por ejemplo, [190,191,192,193,194,195,196,197,198,199,200,201,202,203,204,205,206]).

Muchas especies no humanas utilizan los campos geomagnéticos de la Tierra para actividades como la orientación y la migración estacional, la búsqueda de alimentos, el apareamiento y la construcción de nidos y guaridas [190]. Por ejemplo, las especies de aves migratorias [191, 192], las abejas [193], los murciélagos [194], los peces [195,196,197] y muchas otras especies perciben los campos magnéticos de la Tierra con receptores sensoriales especializados. Los mecanismos probablemente implicados en la magnetorrecepción incluyen la inducción magnética de señales eléctricas débiles en receptores sensoriales especializados [198], interacciones magneto-mecánicas con la magnetita cristalina basada en el hierro [194], y/o interacciones de radicales libres con los fotorreceptores criptocromos [191, 192]. Cada uno de estos procesos de detección muestra una sensibilidad extrema a los cambios de baja intensidad en los campos electromagnéticos. Para una descripción más completa de los mecanismos por los que las especies no humanas utilizan la magneto-recepción para realizar actividades vitales esenciales, véase Levitt et al. [190].

Los siguientes estudios representan algunos de los muchos ejemplos de los efectos perturbadores de las exposiciones de bajo nivel a CEM de RF sobre la magnetorrecepción y el comportamiento natural de la fauna. Se ha informado de que los campos magnéticos oscilantes perturban la capacidad de las aves migratorias para orientarse y navegar en el campo

geomagnético de la Tierra [199,200,201,202]. Las currucas mosquiteras se desorientaron por la exposición a un campo magnético oscilante débil de 1,403 MHz a una intensidad tan baja como 2-3 nT [200]. La orientación de los petirrojos europeos, que utilizan el campo magnético de la Tierra para orientarse con la brújula, se vio completamente perturbada por la exposición a ruido electromagnético en el rango de frecuencias de 50 kHz a 5 MHz o a un FEB de banda ancha modulado por ruido que cubría el rango de ~ 2 kHz a ~ 9 MHz [199, 201]. Se ha demostrado que la radiación de RF en la gama baja de MHz (7,0 MHz de 480 nT o 1,315 MHz de 15 nT) inutiliza la brújula aviar de magnetorrecepción mientras la exposición esté presente [202].

Además de los efectos sobre las aves migratorias, Landler et al. [203] descubrieron que la exposición a un campo magnético de bajo nivel (1,43 MHz a una intensidad de 30-52 nT) alteraba la orientación natural de las tortugas juveniles nacidas en tierra. La radiación de radiofrecuencia de 900 MHz modulada por GSM hizo que las hormigas perdieran su memoria visual y olfativa para encontrar comida [166]. La capacidad de navegación de las truchas se redujo cuando se criaron en condiciones en las que los campos magnéticos estaban distorsionados espacialmente [204].

Las actividades de las abejas también se ven alteradas por la exposición a la radiación de radiofrecuencia. Las radiaciones de telefonía móvil moduladas por GSM (900 MHz) provocaron una reducción de la puesta de huevos por parte de las abejas reina y el agotamiento de los recuentos de polen y miel de las colmenas [205]. La radiación de telefonía celular modulada por GSM (900 MHz) redujo la eclosión y alteró el desarrollo de las pupas de las larvas de las abejas reinas de la miel [206].

La falta de consideración de la exposición crónica a la radiación de radiofrecuencia de bajo nivel en la vida silvestre podría dar lugar a efectos peligrosamente perturbadores en ecosistemas frágiles y en el comportamiento y la supervivencia de especies que han existido durante mucho tiempo en el entorno natural de la Tierra.

G. 5G (5ª generación inalámbrica)

Supuesto 14: *No se necesitan datos sobre los efectos en la salud de la exposición a la 5G; se asume la seguridad porque la penetración se limita a la piel ("mínima penetración en el cuerpo").*

Los sistemas de comunicación inalámbrica de quinta generación (5G) se están desplegando en todo el mundo para proporcionar mayores velocidades de transferencia de datos con tiempos de espera más cortos entre un gran número de dispositivos inalámbricos conectados. Para proporcionar una transferencia más rápida de grandes cantidades de datos (hasta 20 gigabits por segundo de velocidad máxima), la gama de frecuencias de la 5G incluye ondas milimétricas (30 a 300 GHz), además de frecuencias portadoras de hasta 600 MHz. Las ondas milimétricas (MMW, acrónimo en inglés) de frecuencia extremadamente alta que transmiten grandes cantidades de datos a los dispositivos de los usuarios se dirigen en haces estrechos mediante la transmisión en línea de visión con antenas de formación de haces. Como las ondas milimétricas no penetran en estructuras sólidas, como materiales de construcción, colinas, follaje, etc., y sólo recorren distancias cortas (unos pocos cientos de metros), se están instalando redes más densas de estaciones base con transmisores y receptores masivos de múltiple entrada/múltiple salida (MIMO) en millones de pequeñas torres de telefonía móvil en estructuras como postes de servicios públicos. Estas características pueden llevar a una proximidad mucho mayor entre los

seres humanos y las antenas emisoras de radiación y, por tanto, a un cambio en la exposición individual máxima y media a la radiación de RF.

Para una frecuencia 5G de 26 GHz, la absorción de CEM es muy superficial, lo que significa que para la piel humana típica, más del 86% de la potencia incidente se absorbe en el primer milímetro. La profundidad de penetración en la piel se calculó en 1 mm basándose en la conductividad eléctrica de la piel y su permitividad eléctrica [5, 207]. Se espera que esto haga que la TAS (SAR) en este tejido esté muy por encima de los límites recomendados ([208], y Archivo adicional 2: Apéndice 2). También se espera que sea perjudicial para especies muy pequeñas, como las aves y otros animales pequeños (por ejemplo, insectos) [209]. A menudo se afirma que, debido a su escasa penetración, la exposición a la radiación 5G de alta frecuencia es segura, y que el único efecto es el calentamiento de los tejidos [210]. Sin embargo, este punto de vista ignora la penetración más profunda de los componentes de FEB de las señales de RF moduladas, que se califican sólo en función del calor, así como los efectos de las ráfagas cortas de calor de las señales pulsadas [211, 212]. Dentro de los primeros 1 mm de la piel, las células se dividen para renovar el estrato córneo (una consideración para el cáncer de piel), y las terminaciones nerviosas de la dermis están situadas entre 0,6 mm (párpados) y 3 mm (pies) de la superficie (una consideración para los efectos neurológicos). La luz ultravioleta, que ejerce su acción a una profundidad de penetración inferior a 0,1 mm [213, 214] es una causa reconocida de cáncer de piel [87].

Cuanto más alta es la frecuencia de las ondas electromagnéticas, más corta es la longitud de onda y menos profunda es la penetración de la energía en las personas o animales expuestos. Por ejemplo, la profundidad de penetración en el cuerpo humano es de unos 8 mm a 6 GHz y de 0,92 mm a 30 GHz [5]. Debido a la mínima profundidad de absorción de energía en frecuencias superiores a 6 GHz, la FCC y la ICNIRP han basado los límites de exposición en la densidad de potencia en lugar de en los niveles de TAS (SAR). La FCC [3] propuso un límite general de exposición a la densidad de potencia localizada de 4 mW/cm² promediado sobre 1 cm² y que no exceda de 30 minutos para los servicios 5G hasta 3000 GHz para la población general, afirmando que esta exposición es coherente con el SAR promedio espacial máximo de 1,6 W/kg promediado sobre cualquier 1 g de tejido a 6 GHz. Los límites de exposición de la ICNIRP [5] para la 5G son una densidad de potencia absorbida de 200 W/m² (0,2 W/cm²) promediada sobre 4 cm² y un intervalo de 6 minutos para frecuencias de hasta 30 GHz, y 400 W/m² (0,4 mW/cm²) promediada sobre 1 cm² y un intervalo de 6 minutos para frecuencias de 30 GHz a 300 GHz.

Debido a su mínima penetración, la exposición a la radiación 5G provoca una mayor intensidad de energía en la piel y en otras partes del cuerpo directamente expuestas, como la córnea o el cristalino. Sin embargo, la piel, que es el órgano más grande del cuerpo humano, cumple importantes funciones, como la de actuar como barrera física e inmunológica protectora contra las lesiones mecánicas, la infección por microorganismos patógenos y la entrada de sustancias tóxicas. Además, los cánceres de piel, incluidos los carcinomas de células basales y los carcinomas de células escamosas, son los cánceres humanos más frecuentes, mientras que los melanomas son altamente metastásicos y su prevalencia está aumentando. Aunque la elevada incidencia de los cánceres de piel se atribuye en gran medida a la exposición a la luz ultravioleta, no se han comunicado estudios sobre los efectos de la radiación 5G en (i) la capacidad de la piel para proporcionar protección frente a los microorganismos patógenos, (ii) la posible exacerbación de otras enfermedades de la piel, (iii) la promoción de los cánceres de piel inducidos por la luz solar, o (iv) el inicio del cáncer de piel por sí mismo. También se carece de

información sobre los efectos de la radiación 5G en los sistemas nervioso e inmunitario, que también están expuestos incluso por la menor penetración de la onda milimétrica (MMW).

Otro factor importante es el ancho de banda máximo con la radiación 5G, que es de hasta 100 MHz en el rango de frecuencias de 450 MHz a 6 GHz, y de hasta 400 MHz en los rangos de 24 GHz a 52 GHz, en comparación con los tipos anteriores de comunicación móvil en los que el ancho de banda está limitado a 20 MHz. Dado que muchos estudios indicaron efectos de RF no térmicos dependientes de la frecuencia de la radiación de RF de las comunicaciones móviles [43, 177] y para los efectos de la MMW [215, 216], la posibilidad de ventanas de frecuencia efectivas para los efectos biológicos aumentaría con el aumento del ancho de banda de la radiación 5G.

Otra consideración para los efectos de la exposición a la 5G en la salud humana es que los pulsos de radiación creados por las velocidades de transmisión de datos extremadamente rápidas tienen el potencial de generar ráfagas de energía que pueden viajar a mucha más profundidad de lo previsto por los modelos convencionales [217, 218]. Neufeld y Kuster [105] demostraron que los pulsos repetitivos de datos en ráfagas con exposiciones cortas a la 5G pueden causar picos de temperatura localizados en la piel que conducen a daños permanentes en los tejidos, incluso cuando los valores de densidad de potencia media estaban dentro de los límites de seguridad aceptables de la ICNIRP. Los autores instaron a establecer nuevas normas de seguridad térmica para abordar el tipo de riesgos para la salud posibles con la tecnología 5G:

"La QUINTA generación de tecnología de comunicación inalámbrica (5G) promete facilitar la transmisión a velocidades de datos hasta un factor 100 veces superior al 4G. Para ello, se emplearán frecuencias más altas (incluidas las bandas de ondas milimétricas), esquemas de modulación de banda ancha y, por tanto, señales más rápidas con tiempos de subida y bajada más pronunciados, potencialmente en combinación con el funcionamiento por pulsos para el acceso múltiple en el dominio del tiempo... Los umbrales para las frecuencias superiores a 10 MHz establecidos en las actuales directrices de exposición (ICNIRP 1998, IEEE 2005, 2010) tienen por objeto limitar el calentamiento de los tejidos. Sin embargo, los pulsos cortos pueden dar lugar a importantes oscilaciones de temperatura, que pueden agravarse aún más a altas frecuencias (>10 GHz, fundamentales para la 5G), donde la escasa profundidad de penetración provoca un intenso calentamiento de la superficie y un aumento brusco y rápido de la temperatura..."

Las áreas de incertidumbre y las preocupaciones de salud con la radiación 5G incluyen el aumento potencial de las tasas de cáncer de piel con (o posiblemente sin) la co-exposición a la luz solar, la exacerbación de las enfermedades de la piel, la mayor susceptibilidad a los microorganismos patógenos, el daño a la córnea o el desarrollo temprano de cataratas, los efectos testiculares, y la posible absorción mejorada por resonancia debido a las estructuras de la piel [219]. Uno de los complejos desafíos técnicos en relación con la exposición humana a las ondas milimétricas 5G es que no se conocen bien los imprevisibles patrones de propagación que podrían dar lugar a niveles inaceptables de exposición humana a la radiación electromagnética [220]. Aunque las ondas milimétricas se absorben casi por completo en un radio de 1-2 mm en los tejidos biológicamente equivalentes, sus efectos pueden penetrar más profundamente en un cuerpo humano vivo, posiblemente afectando a las vías de transducción de señales. Por lo tanto, hay demasiadas incertidumbres con la exposición a la 5G para apoyar una suposición de seguridad sin datos adecuados sobre los efectos en la salud. No hay estudios adecuados sobre los efectos en la salud de las exposiciones a corto o largo plazo a la radiación 5G en modelos animales o en humanos.

Discusión

Para desarrollar límites de exposición basados en la salud para sustancias tóxicas y cancerígenas, los organismos reguladores suelen basarse en las pruebas científicas disponibles sobre el agente en cuestión. A mediados y finales de los años 90, cuando la FCC [4] y la ICNIRP [9] establecieron inicialmente los límites de exposición a la radiación de RF, los supuestos predominantes eran que cualquier efecto adverso de la exposición a la radiación de RF se debía al calentamiento excesivo porque la radiación no ionizante no tenía suficiente energía para romper los enlaces químicos o dañar el ADN. Sin embargo, los efectos no térmicos de la radiación de RF se demuestran a partir de estudios que encuentran efectos diferentes con la exposición a ondas continuas frente a ondas pulsadas o moduladas a la misma frecuencia y la mismo TAS (SAR) o densidad de potencia, por ejemplo, [221,222,223,224,225,226], y a partir de estudios que muestran efectos adversos a intensidades de exposición muy bajas, por ejemplo, [78, 96].

Los estudios de exposición aguda realizados en ratas y monos en la década de 1980 [10, 11] sugirieron que una TAS (SAR) de 4 W/kg podría ser una dosis umbral para los efectos conductuales. Dado que esta TAS (SAR) se asoció con un aumento aproximado de la temperatura corporal de 1 °C, se volvió a suponer que no se producirían efectos adversos para la salud si los aumentos de la temperatura corporal central eran inferiores a 1 °C. A partir de esta dosis umbral putativa se aplicó un "factor de seguridad" de 10 para las exposiciones laborales y un factor adicional de 5 (50 veces en total) para la población general, lo que dio como resultado unos límites de exposición en los que la TAS (SAR) de todo el cuerpo era inferior a 0,4 W/kg para los trabajadores y a 0,08 W/kg para la población general. Sin embargo, al darse cuenta de que las partes locales del cuerpo podían recibir dosis de la radiación de RF entre 10 y 20 veces superiores a los SAR de todo el cuerpo, la FCC fijó los límites de exposición máxima local en TAS (SAR) 20 veces superiores a las TAS (SAR) de todo el cuerpo, es decir, 8 W/kg de media sobre cualquier 1 g de tejido para las exposiciones localizadas de los trabajadores y 1,6 W/kg de media sobre cualquier 1 g para la población general [3, 4]. La ICNIRP optó por exposiciones corporales parciales que no superaran los 2,0 W/kg promediados sobre cualquier 10 g de tejido en forma de cubo para la población general [5, 9]. Para justificar el menor factor de seguridad para los trabajadores (10 veces) frente a la población general (50 veces), una de las afirmaciones de la ICNIRP [24] es que los trabajadores están informados de los riesgos asociados a la exposición a las radiaciones no ionizantes y de cómo reducir estos riesgos, mientras que "el público en general, en la mayoría de los casos, no es consciente de su exposición a las radiaciones no ionizantes y, sin educación, no se puede esperar razonablemente que tome precauciones para minimizar o evitar cualquier efecto adverso de la exposición". Desde el punto de vista de la salud pública, la FCC y la ICNIRP deberían concienciar al público de su exposición a la radiación de RF y promover medidas de precaución para minimizar los posibles efectos adversos, especialmente para los niños y las mujeres embarazadas. En la Tabla 2 se muestran ocho recomendaciones prácticas del Llamamiento Internacional de Científicos CEM destinadas a proteger y educar al público sobre los posibles efectos adversos para la salud de las exposiciones a los CEM no ionizantes [227].

Tabla 2. Medidas de precaución recomendadas por la International EMF Scientist Appeal

- 1) Se debe dar prioridad a la protección de niñas y niños y de las mujeres embarazadas
- 2) Deben fortalecerse las directrices y las normas reglamentarias
- 3) Se debe alentar a los fabricantes a desarrollar tecnologías más seguras
- 4) El público debe estar completamente informado sobre los riesgos potenciales para la salud de la energía electromagnética y se le deben enseñar estrategias de reducción de daños.
- 5) Los profesionales médicos deben ser educados sobre los efectos biológicos de la energía electromagnética y recibir capacitación sobre el tratamiento de pacientes con sensibilidad electromagnética.
- 6) Los gobiernos deben financiar la capacitación y la investigación sobre campos electromagnéticos y salud que sea independiente de la industria.
- 7) Los medios de comunicación deben revelar las relaciones financieras de las personas expertas con la industria al citar sus opiniones sobre los aspectos de salud y seguridad de las tecnologías emisoras de EMF.
- 8) Es necesario establecer áreas libres de radiación, especialmente para personas con EHS.

Los estudios de comportamiento agudo en los que se basan los límites de exposición de la FCC y la ICNIRP carecen de información sobre los posibles efectos de la radiación de radiofrecuencia que pueden producirse tras períodos de exposición más largos, y no abordan los efectos de las modulaciones de las ondas portadoras utilizadas en las comunicaciones inalámbricas. La investigación sobre la radiación de RF llevada a cabo en los últimos 25 años ha producido miles de artículos científicos, muchos de los cuales demuestran que los estudios de comportamiento agudo son inadecuados para desarrollar límites de exposición que protejan la salud de los seres humanos y de la vida silvestre, y que las suposiciones inherentes que subyacen a los límites de exposición de la FCC y de la ICNIRP no son válidas. En primer lugar, 4 W/kg no es un umbral de SAR para los efectos sobre la salud causados por las exposiciones a las radiaciones de RF; los estudios experimentales a dosis más bajas y para duraciones de exposición más prolongadas demostraron la existencia de cardiomiopatía, carcinogenicidad, daños en el ADN, efectos neurológicos, aumento de la permeabilidad de la barrera hematoencefálica y daños en el esperma (véanse los supuestos 1-3). Múltiples estudios epidemiológicos sólidos sobre la radiación de los teléfonos celulares han encontrado un mayor riesgo de tumores cerebrales (Supuesto 6), y éstos están respaldados por una clara evidencia de carcinogenicidad de los mismos tipos de células (células gliales y células de Schwann) a partir de estudios en animales. Incluso los estudios realizados por D'Andrea et al. [89, 90] antes de que se adoptaran los límites encontraron alteraciones del comportamiento en ratas expuestas a radiación de RF durante 14 o 16 semanas con TAS (SAR) promedio de 0,7 W/kg y de 1,23 W/kg. Una combinación de la duración y la intensidad de la exposición sería más apropiada para establecer normas de seguridad para la exposición a la radiación de RF de los sistemas de comunicación móvil, incluidos los teléfonos móviles, las estaciones base y el WiFi.

Más de 120 estudios han demostrado efectos oxidativos asociados a la exposición a radiación de RF de baja intensidad (archivo adicional 1: Apéndice 1). Los daños en el ADN que se han notificado en los estudios sobre la radiación de RF fueron causados muy probablemente por la inducción del estrés oxidativo, que es una característica clave de los carcinógenos humanos [88], más que por la ionización directa (suposición 2). La generación de especies reactivas de oxígeno también se ha relacionado con el daño al ADN y la carcinogenicidad de la radiación UVA [87] y del amianto [228]. A pesar de la enorme cantidad de pruebas científicas sobre los efectos de las dosis bajas de radiación de RF, el IEEE [229] mantiene que la alteración del comportamiento sigue siendo el efecto más sensible y reproducible de la radiación de RF. Es esta opinión la que

contribuyó a que la FCC [3] y la ICNIRP [5] reafirmaran sus anteriores límites de exposición a la radiación de RF.

Otras preocupaciones sobre los actuales límites de exposición a la radiación de RF son que no tienen en cuenta los posibles efectos sinérgicos debidos a la coexposición a otros agentes tóxicos o cancerígenos, el impacto de la radiación pulsada o las modulaciones de frecuencia, las frecuencias múltiples, las diferencias en los niveles de absorción o de susceptibilidad de los niños, o las diferencias entre los individuos en su sensibilidad a la radiación de RF (véanse los supuestos 4, 5, 7 y 8). Actualmente, las exposiciones acumuladas de los niños son mucho más elevadas que las de las generaciones anteriores y siguen aumentando [230]. La ICNIRP [23, 179] reconoció que sus directrices no tienen en cuenta a los subgrupos sensibles y admite las dificultades para separar los "efectos biológicos" de los "efectos sobre la salud". Los síntomas neurológicos, algunos de los cuales son reconocidos por la ICNIRP y que actualmente experimentan las personas con EHS, son sin duda "efectos sobre la salud" no térmicos que deben mitigarse proporcionando entornos con exposiciones reducidas a los CEM antropogénicos para los individuos hipersensibles.

Los efectos debilitantes y las restricciones que sufren los adultos y los niños con EHS constituyen una contravención de la Ley de Igualdad de 2010, la Ley de Derechos Humanos y otros marcos éticos y legales. La falta de respuesta y salvaguarda adecuada de este grupo ya está causando una morbilidad y mortalidad evitables y un déficit económico debido a la pérdida de días de trabajo, las indemnizaciones por daños a la salud y el aumento de los costes sanitarios. Por el contrario, dar cabida a este grupo, como sugiere la ICNIRP [179], actuando para "ajustar las directrices para la población general para incluir a estos grupos", no sólo reduciría los impactos negativos para las personas con EHS, sino que también mejoraría la salud pública en general, dados los otros problemas de salud relacionados con los RNI que se destacan en este documento.

Basar los límites de exposición tisular local en cubos de 1 g [3] o 10 g [5] subestima sustancialmente el TAS (SAR) espacial máximo en comparación con basar los límites de exposición tisular local en cubos más pequeños (por ejemplo, 100 mg o 10 mg), y por tanto no son parámetros dosimétricos fiables para evaluar la absorción de CEM en frecuencias superiores a 1 GHz (supuestos 11, 12). Los volúmenes especificados por la FCC y la ICNIRP para los límites de TAS (SAR) de los tejidos locales son demasiado grandes para centrarse en las células madre, que son objetivos importantes para la carcinogénesis. Para reducir los riesgos para la salud derivados de las exposiciones a la radiación de RF, los límites para la distribución localizada del SAR deberían basarse en cubos de 100 mg, o preferiblemente de 10 mg.

Otra deficiencia importante planteada en este documento es que ni la FCC ni la ICNIRP abordan la preocupación por los efectos ambientales de las radiaciones de RF en la fauna silvestre, a pesar de que existe una amplia literatura que demuestra los efectos perturbadores de las radiaciones de RF en el comportamiento de la fauna silvestre (supuesto 13).

Los factores de incertidumbre/seguridad seleccionados arbitrariamente que se aplican al umbral supuesto de TAS (SAR) para la radiación de RF son lamentablemente inadecuados para proteger la salud pública (supuestos 9, 10). Basándose en la forma en que la Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU., el Consejo Internacional de Armonización y el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (NIOSH de EE.UU.) aplican los factores de incertidumbre/seguridad a un nivel sin efecto adverso observado (NOAEL) en animales de experimentación [182,183,184], el factor de seguridad para la radiación de RF sería como

mínimo de 900 a 10.000, lo que es de 18 a 200 veces mayor que el factor de seguridad recomendado por la FCC y la ICNIRP para la población general. Este gran factor de seguridad se basa en los ajustes para la variabilidad humana, la exposición a lo largo de la vida a partir de estudios a corto plazo y las insuficiencias de las bases de datos que incluyen una caracterización incompleta de la toxicidad de la radiación de RF. Está claro que los estudios de comportamiento agudo que sirvieron de base para los actuales límites de exposición a la radiación de RF no son adecuados para caracterizar los riesgos para la salud humana asociados a la exposición a largo plazo a este tipo de radiación. El informe del NCRP de 1986 [6] y el documento del ANSI/IEEE de 1992 [7] reconocieron que cuando se disponga de futuros estudios sobre los efectos biológicos de la radiación de RF, incluidos los efectos de las exposiciones crónicas o las pruebas de las interacciones no térmicas, será necesario evaluar y posiblemente revisar las normas de exposición. Cuando la FCC [3] y la ICNIRP [5] reafirmaron sus límites de exposición de los años 90, desestimaron las pruebas científicas que invalidaban los supuestos en los que se basaban dichos límites de exposición. Es necesaria una reevaluación independiente de los límites de exposición a la radiación de RF basada en los conocimientos científicos adquiridos en los últimos 25 años, que debería haberse realizado hace tiempo. Esta evaluación debería ser llevada a cabo por científicos y médicos que no tengan intereses en conflicto y que sean expertos en la exposición a CEM de RF y en dosimetría, toxicología, epidemiología, evaluación clínica y evaluación de riesgos. Deben tomarse precauciones especiales para garantizar que las interpretaciones de los datos sobre los efectos en la salud y el establecimiento de los límites de exposición a la radiación de RF no estén influenciados por el ejército o la industria de las telecomunicaciones. Mientras tanto, los fabricantes deberían estar obligados a desarrollar tecnologías más seguras [227].

Por último, señalamos nuestra preocupación por el despliegue en todo el mundo de las redes de comunicación 5G para una transferencia más rápida de grandes cantidades de datos, pero sin estudios adecuados sobre los efectos en la salud que demuestren la seguridad de las ondas milimétricas de alta frecuencia. Debido a las limitaciones de la penetración y la distancia de viaje de las ondas milimétricas, se están montando densas redes de estaciones base en estructuras como postes de servicios públicos en ciudades muy pobladas. Además, dado que la absorción de los CEM en frecuencias superiores a 6 GHz es mínima, la ICNIRP [5] ha especificado la densidad de potencia absorbida (S_{ab}) como parámetro dosimétrico para los "efectos de calentamiento" en las frecuencias más altas. S_{ab} es una función de la densidad de potencia incidente (S_{inc}) y del coeficiente de reflexión de entrada (Γ). En los escenarios de campo cercano, el S_{inc} no tiene un valor singular; esto se debe en gran medida a la naturaleza heterogénea de los tejidos del cuerpo humano y sus parámetros relevantes (como la permitividad, la conductividad equivalente, la densidad de masa), que varían en diferentes regiones del cuerpo y con la frecuencia. Por lo tanto, a menos que se utilice un potente método de simulación de CEM junto con modelos humanos realistas, los valores del S_{inc} y del coeficiente de reflexión serían difíciles de estimar con precisión, lo que haría que el S_{ab} resultante no fuera fiable.

La suposición de que la 5G es segura en los límites de densidad de potencia recomendados por la ICNIRP (50 W/m² y 10 W/m² promediados durante 6 minutos para exposiciones ocupacionales y 30 minutos para exposiciones públicas, respectivamente) debido a su mínima penetración en el cuerpo no justifica que se desestime la necesidad de realizar estudios sobre los efectos en la salud antes de implementar las redes 5G. Las nuevas redes de comunicación darán lugar a exposiciones a una forma de radiación que no ha sido experimentada anteriormente por el público en general (supuesto 14). La implantación de la tecnología 5G sin una información adecuada sobre los efectos en la salud plantea muchas preguntas, como por

ejemplo La exposición a la radiación 5G: (i) ¿comprometerá la capacidad de la piel para proporcionar protección contra los microorganismos patógenos? (ii) ¿agravará el desarrollo de enfermedades de la piel? (iii) ¿aumentará el riesgo de cánceres de piel inducidos por la luz solar? (iv) ¿aumentará el riesgo de dañar el cristalino o la córnea? (v) ¿aumentará el riesgo de daños testiculares? (vi) ¿ejercerá efectos tisulares más profundos, ya sea de forma indirecta tras los efectos en las estructuras superficiales o de forma más directa debido a la penetración más profunda de los componentes de FEB de las señales de RF moduladas? (vii) ¿afectará negativamente a las poblaciones de animales salvajes? Las respuestas a estas preguntas y a otras que son relevantes para la salud de las personas y de la fauna silvestre deben darse antes de que se produzcan exposiciones generalizadas a la radiación 5G, no después. Basándonos en las lecciones que deberían haberse aprendido de los estudios sobre la radiación de RF en frecuencias inferiores a 6 GHz, no deberíamos seguir confiando en la suposición no probada de que la tecnología inalámbrica actual o futura, incluida la 5G, es segura sin las pruebas adecuadas. Hacer lo contrario no redundaría en beneficio de la salud pública ni del medio ambiente.

Abreviaturas:

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (*American National Standards Institute*).

CDMA: Acceso múltiple por división de código (*Code-division multiple Access*).

dB: Decibel.

CEM: Campos electromagnéticos. En inglés: *EMF* (Electromagnetic field).

DECT: Telecomunicaciones Inalámbricas Mejoradas Digitalmente (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) [Nota del traductor: es un estándar ETSI para teléfonos inalámbricos digitales, comúnmente utilizado para propósitos domésticos o corporativos]

EHS: Electrohipersensibilidad o Hipersensibilidad Electromagnética (*Electromagnetic hypersensitivity*).

ERO: Especies Reactivas de Oxígeno. En inglés: *Reactive Oxygen Species (ROS)*.

FEB: Frecuencias Extremadamente Bajas. En inglés: *ELF (Extremely low frequency)*.

FCC: La Comisión Federal de Comunicaciones de EE.UU. (*Federal Communications Commission*).

FDA: La Administración de Alimentos y Medicamentos de EE.UU. (*Food and Drug Administration*).

GHz: Gigahercio.

GBM: Cáncer cerebral de glioblastoma multiforme

GSM: Sistema global para las comunicaciones móviles (*Global System for Mobile Communication*).

IARC: Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (*International Agency for Research on Cancer*).

ICNIRP: Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*).

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers), organización profesional internacional.

LTE: *Long Term Evolution* (4G).

MMW: Onda milimétrica (*Millimeter wave*).

NCRP: El Consejo Nacional de Mediciones y Protección contra la Radiación de EE.UU. (*National Council on Radiation Protection and Measurements*).

nT: Nanotesla.

NTP: Programa Nacional de Toxicología de los EE. UU. (*National Toxicology Program*).

8-OHdG: 8-hidroxi-2'-deoxiguanosina.

psSAR: Tasa de Absorción Específica espacial máxima (*Peak spatial specific absorption rate*).

RF: Radiofrecuencia. En inglés *FR* o *RFR* (radiación de radiofrecuencia).

RNI: Radiación No Ionizante. En inglés: *NIR (Non-ionizing radiation)*.

TAS: Tasa de Absorción Específica. En inglés: *Specific Absorption Rate (SAR)*.

UMTS: *Universal Mobile Telecommunications Service (3G)*.

RUV: Radiación Ultravioleta. En inglés: *Ultraviolet radiation (UVR)*.

5G: 5ª generación de tecnologías de telefonía móvil.

Información complementaria:

Archivo adicional 1: Apéndice 1 Tabla 1. Estudios que demuestran un mayor daño oxidativo del ADN y otros indicadores de estrés oxidativo con una TAS (SAR) < 4 W/kg.

Descarga en línea: https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1186%2Fs12940-022-00900-9/MediaObjects/12940_2022_900_MOESM1_ESM.docx

Archivo adicional 2: Apéndice 2. Sobre la inadecuación del parámetro dosimétrico psSAR en frecuencias superiores a 1 GHz. Tabla 1. Permisividad eléctrica y conductividad eléctrica de la materia gris. Figura 1. Un bloque de materia gris radiado por diferentes frecuencias. Los cubos resaltados son de 10 g, 1 g, 100 mg y 10 mg. Figura 2. Un bloque de materia gris irradiado por diferentes frecuencias. Los cubos resaltados son de 10 g, 1 g, 100 mg y 10 mg. Fig. 3. Intensidad del campo eléctrico promediada en cada cubo para diferentes frecuencias: en el eje izquierdo, el campo eléctrico está en dB y en el eje derecho el campo eléctrico está en V/m normalizado a 100 V/m.

Descarga en línea: https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1186%2Fs12940-022-00900-9/MediaObjects/12940_2022_900_MOESM2_ESM.docx

Referencias bibliográficas:

1. US Environmental Protection Agency (US EPA). "Guidelines for carcinogen risk assessment", EPA/630/P-03/001F. Washington, DC; 2005. Available at https://www3.epa.gov/airtoxics/cancer_guidelines_final_3-25-05.pdf
2. US Environmental Protection Agency (US EPA). "Supplemental guidance for assessing susceptibility for early-life exposure to carcinogens", EPA/630/R-03/003F. Washington, DC; 2005. Available at https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-09/documents/childrens_supplement_final.pdf
3. Federal Communications Commission (FCC). "Proposed Changes in the Commission's Rules Regarding Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields; Reassessment of Federal Communications Commission Radiofrequency Exposure Limits and Policies", FCC19-126, 2019. <https://www.federalregister.gov/documents/2020/04/06/2020-06966/human-exposure-to-radiofrequency-electromagnetic-fields>
4. Federal Communications Commission (FCC). "Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields", 1997. OET Bulletin 65. https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/bulletins/oet65/oet65.pdf
5. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Phys. 2020;118:483-524. [Article Google Scholar](#)
6. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). "Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields", NCRP Report No. 86, 1986. <https://ncrponline.org/publications/reports/ncrp-report-86/>
7. American National Standards Institute (ANSI), "Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," ANSI/IEEE C95.1-1992. <https://emfguide.itu.int/pdfs/c95.1-2005.pdf>
8. D'Andrea JA, Adair ER, de Lorge JO. Behavioral and cognitive effects of microwave exposure. Bioelectromagnetics Suppl. 2003;6:S39-62.

9. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998;74:494–522. [Article](#) [Google Scholar](#)
10. De Lorge JO, Ezell CS. Observing-responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves. *Bioelectromagnetics.* 1980;1:183–98. [Google Scholar](#)
11. De Lorge JO. Operant behavior and colonic temperature of *Macaca mulatta* exposed to radio frequency fields at and above resonant frequencies. *Bioelectromagnetics.* 1984;5:233–46. [Article](#) [Google Scholar](#)
12. Lotz WG. Hyperthermia in radiofrequency-exposed rhesus monkeys: a comparison of frequency and orientation effects. *Radiat Res.* 1985;102:59–70. [Article](#) [Google Scholar](#)
13. Stuchly MA. Potentially hazardous microwave radiation source—a review. *J Microw Power.* 1977;12(4):369–81. [Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
14. Adair RK. Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation. *Bioelectromagnetics.* 2003;24:39–48. [Article](#) [Google Scholar](#)
15. Prohofsky EW. RF absorption involving biological macromolecules. *Bioelectromagnetics.* 2004;25:441–51. [Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
16. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). In: Vecchia P, Matthes R, Ziegelberger G, Lin J, Saunders R, Swerdlow, editors. Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz); 2009. <https://www.icnirp.org/en/publications/article/hf-review-2009.html>. [Google Scholar](#)
17. Food and Drug Administration (FDA). 1999. FDA's nomination of RF radiation in 1999 for the NTP study. Available at https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/chem_background/exsumpdf/wireless051999_508.pdf
18. National Toxicology Program (NTP). NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd:Sprague Dawley SD rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones, Technical report series no. 595. Research Triangle Park: National Institutes of Health, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services; 2018. https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt_rpts/tr595_508.pdf?utm_source=direct&utm_medium=prod&utm_campaign=ntpgolinks&utm_term=tr595 [Google Scholar](#)
19. National Toxicology Program (NTP). NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1,900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones, Technical report series no. 596. Research Triangle Park: National Institutes of Health, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services; 2018. https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt_rpts/tr596_508.pdf?utm_source=direct&utm_medium=prod&utm_campaign=ntpgolinks&utm_term=tr596 [Google Scholar](#)
20. Chou CK, Guy AW, Kunz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH. Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics.* 1992;13:469–96. [Book](#) [Google Scholar](#)
21. National Toxicology Program (NTP). National Toxicology Program peer review of the draft NTP technical reports on cell phone radiofrequency radiation. Research Triangle Park: National Institute of Environmental Health Sciences; 2018. Available at https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about_ntp/trpanel/2018/march/peerreview20180328_508.pdf [Google Scholar](#)
22. Falcioni L, Bua L, Tibaldi E, Lauriola M, DeAngelis L, Gnudi F, et al. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile

phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz base station environmental emission. *Environ Res.* 2018;165:496–503.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

23. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Principles for non-ionizing radiation protection. *Health Phys.* 2020;118:477–82.

[Article](#) [Google Scholar](#)

24. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). ICNIRP note: critical evaluation of two radiofrequency electromagnetic field animal carcinogenicity studies published in 2018. *Health Phys.* 2020;118:525–32.

[Article](#) [Google Scholar](#)

25. Melnick R. Regarding ICNIRP's evaluation of the National Toxicology Program's carcinogenicity studies of radiofrequency electromagnetic fields. *Health Phys.* 2020;118:678–82.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

26. Wyde M, Horn R, Capstick MH, Ladbury JM, Koepke G, Wilson PF, et al. Effect of cell phone radiofrequency radiation on body temperature in rodents: pilot studies of the National Toxicology Program's reverberation chamber exposure system. *Bioelectromagnetics.* 2018;39:190–9.

[Article](#) [Google Scholar](#)

27. Fragopoulou AF, Miltiadous P, Stamatakis A, Stylianopoulou F, Koussoulakos SL, Margaritis LH. Whole body exposure with GSM 900-MHz affects spatial memory in mice. *Pathophysiology.* 2010;17:179–87.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

28. Li Y, Shi C, Lu G, Xu Q, Liu S. Effects of electromagnetic radiation on spatial memory and synapses in rat hippocampal CA1. *Neural Regen Res.* 2012;7:1248–55.

[Google Scholar](#)

29. Narayanan SN, Kumar RS, Karun KM, Nayak SB, Bhat PG. Possible cause for altered spatial cognition of prepubescent rats exposed to chronic radiofrequency electromagnetic radiation. *Metab Brain Dis.* 2015;30:1193–206.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

30. Razavinasab M, Moazzami K, Shabani M. Maternal mobile phone exposure alters intrinsic electrophysiological properties of CA1 pyramidal neurons in rat offspring. *Toxicol Ind Health.* 2016;32:968–79.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

31. Schneider J, Stangassinger M. Nonthermal effects of lifelong high-frequency electromagnetic field exposure on social memory performance in rats. *Behav Neurosci.* 2014;128:633–7.

[Article](#) [Google Scholar](#)

32. Tang J, Zhang Y, Yang L, Chen Q, Tan L, Zuo S, et al. Exposure to 900 MHz electromagnetic fields activates the mcp-1/ERK pathway and causes blood-brain barrier damage and cognitive impairment in rats. *Brain Res.* 2015;1601:92–101.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

33. Lai H. A summary of recent literature (2007-2017) on neurobiological effects of radiofrequency radiation. In: Markov M, editor. *Mobile communications and public health*. Boca Raton: CRC press; 2018. p. 187–222. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b22486-8/summary-recent-literature-2007-2017-neurobiological-effects-radio-frequency-radiation-henry-lai>.

[Chapter](#) [Google Scholar](#)

34. Hardell L, Söderqvist F, Carlberg M, Zetterberg H, Hansson-Mild K. Exposure to wireless phone emissions and serum beta-trace protein. *Int J Mol Med.* 2010;26:301–6.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

35. Frey AH, Feld SR, Frey B. Neural function and behavior: defining the relationship. *Ann N Y Acad Sci.* 1975;247:433–9.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

36. Persson BR, Salford LG, Brun A, Eberhardt JL, Malmgren L. Increased permeability of the blood-brain barrier induced by magnetic and electromagnetic fields. *Ann N Y Acad Sci.* 1992;649:356–8.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

37. Salford LG, Brun A, Stuesson K, Eberhardt JL, Persson BR. Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz. *Microsc Res Tech.* 1994;15:535–42.

[Article](#) [Google Scholar](#)

38. Eberhardt JL, Persson BR, Brun AE, Salford LG, Malmgren LO. Blood-brain barrier permeability and nerve cell damage in rat brain 14 and 28 days after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Electromagn Biol Med*. 2008;27:215–29.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

39. Nittby H, Brun A, Eberhardt J, Malmgren L, Persson BR, Salford LG. Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM- 900 mobile phone. *Pathophysiology*. 2009;16:103–12.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

40. Sirav B, Seyhan N. Effects of radiofrequency radiation exposure on blood-brain barrier permeability in male and female rats. *Electromagn Biol Med*. 2011;30:253–60.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

41. Sirav B, Seyhan N. Effects of GSM modulated radio-frequency electromagnetic radiation on permeability of blood-brain barrier in male & female rats. *J Chem Neuroanat*. 2016;75:123–7.

[Article](#) [Google Scholar](#)

42. Schuermann D, Mevissen M. Manmade electromagnetic fields and oxidative stress – biological effects and consequences for health. *Int J Mol Sci*. 2021;22:3772. <https://doi.org/10.3390/ijms22073772>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

43. Belyaev IY. 2010. Dependence of non-thermal biological effects of microwaves on physical and biological variables: implications for reproducibility and safety standards. *Eur J Oncol – Library*. 2010;5:187–218.

[Google Scholar](#)

44. International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC monograph on the evaluation of carcinogenic risks to humans: non-ionizing radiation, part 2: radiofrequency electromagnetic fields. Lyon, France, 102; 2013. p. 1–460. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Non-ionizing-Radiation-Part-2-Radiofrequency-Electromagnetic-Fields-2013>

[Google Scholar](#)

45. Prausnitz S, Susskind C. Effects of chronic microwave irradiation on mice. *Ire Trans Biomed Electron*. 1962;9:104–8.

[Article](#) [Google Scholar](#)

46. La Vignera S, Condorelli RA, Vicari E, D'Agata R, Calogero AE. Effects of the exposure to mobile phones on male reproduction: a review of the literature. *J Androl*. 2012;33:350–6.

[Article](#) [Google Scholar](#)

47. Kesari KK, Kumar S, Nirala J, Siddiqui MH, Behari J. Biophysical evaluation of radiofrequency electromagnetic field effects on male reproductive pattern. *Cell Biochem Biophys*. 2013;65:85–96.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

48. Kesari KK, Agarwal A, Henkel R. Radiations and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol*. 2018;16:118. <https://doi.org/10.1186/s12958-018-0431-1>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

49. Zha XD, Wang WW, Xu S, Shang XJ. Impacts of electromagnetic radiation from cellphones and Wi-fi on spermatogenesis. *Zhonghua Nan Ke Xue*. 2019;25:451–45.

[Google Scholar](#)

50. Yadav H, Rai U, Singh R. Radiofrequency radiation: a possible threat to male fertility. *Reprod Toxicol*. 2021;100:90–100.

[Article](#) [Google Scholar](#)

51. Agarwal A, Desai NR, Makker K, Varghese A, Mouradi R, Sabanegh E, et al. Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study. *Fertil Steril*. 2009;92:1318–25.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

52. Adams JA, Galloway TS, Mondal D, Esteves SC, Mathews F. Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 2014;70:106–12.

[Article](#) [Google Scholar](#)

53. Dama MS, Bhat MN. Mobile phones affect multiple sperm quality traits: a meta-analysis. *F100Res*. 2013;2:40. <https://doi.org/10.12688/f1000research.2-40.v1>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

54. Kim S, Han D, Ryu J, Kim K, Kim YH. Effects of mobile phone usage on sperm quality - no time-dependent relationship on usage: a systematic review and updated meta-analysis. *Environ Res*. 2021;202:111784. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111784>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
55. Yu G, Bai Z, Song C, Cheng Q, Wang G, Tang Z, et al. Current progress on the effect of mobile phone radiation on sperm quality: an updated systematic review and meta-analysis of human and animal studies. *Environ Pollut*. 2021;282:116592. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116592>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
56. Zilberlicht A, Wiener-Megnazi Z, Sheinfeld Y, Grach B, et al. Habits of cell phone usage and sperm quality - does it warrant attention? *Reprod BioMed Online*. 2015;31:421–6.
[Article](#) [Google Scholar](#)
57. Zalata A, El-Samanoudy AZ, Shaalan D, El-Baiomy Y, Mostafa T. In vitro effect of cell phone radiation on motility, DNA fragmentation and clusterin gene expression in human sperm. *Int J Fertil Steril*. 2015;9:129–36.
[CAS](#) [Google Scholar](#)
58. De Iuliis GN, Newey RJ, King BV, Aitken RJ. Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One*. 2009;4:e6446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006446>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
59. Kesari K, Kumar S, Behari J. Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Indian J Exp Biol*. 2010;48:987–92.
[CAS](#) [Google Scholar](#)
60. Alkis ME, Akdag MZ, Dasdag S, Yegin K, Akpolat V. Single-strand DNA breaks and oxidative changes in rat testes exposed to radiofrequency radiation emitted from cellular phones. *Biotechnol Biotechnol Equip*. 2019;33:1733–40.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
61. Gautam R, Singh KV, Nirala J, Murmu NN, et al. Oxidative stress-mediated alterations on sperm parameters in male Wistar rats exposed to 3G mobile phone radiation. *Andrologia*. 2019;51:e13201. <https://doi.org/10.1111/and.13201>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
62. Yu G, Tang Z, Chen H, Chen Z, Wang L, Cao H, et al. Long-term exposure to 4G smartphone radiofrequency electromagnetic radiation diminished male reproductive potential by directly disrupting Spock3-MMP2-BTB axis in the testes of adult rats. *Sci Total Environ*. 2020;698:133860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133860>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
63. Andrašková S, Holovská K, Ševčíková Z, Andrejčáková Z, et al. The potential adverse effect of 2.45 GHz microwave radiation on the testes of prenatally exposed peripubertal male rats. *Histol Histopathol*. 2021;18402. <https://doi.org/10.14670/HH-18-402>.
64. Houston BJ, Nixon B, McEwan KE, Martin JH, King BV, Aitken RJ, et al. Whole-body exposures to radiofrequency-electromagnetic energy can cause DNA damage in mouse spermatozoa via an oxidative mechanism. *Sci Rep*. 2019;9:17478. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53983-9>.
[Article](#) [Google Scholar](#)
65. Houston BJ, Nixon B, King B, Aitken RJ, De Iuliis GN. Probing the origins of 1,800 MHz radio frequency electromagnetic radiation induced damage in mouse immortalized germ cells and spermatozoa *in vitro*. *Front Public Health*. 2018;6:270. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00270>.
[Article](#) [Google Scholar](#)
66. Kesari KK, Behari J. Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of ROS. *Electromagn Biol Med*. 2012;31:213–22.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
67. Kumar S, Behari J, Sisodia R. Influence of electromagnetic fields on reproductive system of male rats. *Int J Radiat Biol*. 2013;89:147–54.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
68. Pandey N, Giri S, Das S, Upadhaya P. Radiofrequency radiation (900 MHz)-induced DNA damage and cell cycle arrest in testicular germ cells in Swiss albino mice. *Toxicol Ind Health*. 2017;33:373–84.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

69. Smith-Roe SL, Wyde ME, Stout MD, Winters JW, et al. Evaluation of the genotoxicity of cell phone radiofrequency radiation in male and female rats and mice following subchronic exposure. *Environ Mol Mutagen*. 2020;61:276–90.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

70. Akdag M, Dasdag S, Canturk F, Akdag MZ. Exposure to non-ionizing electromagnetic fields emitted from mobile phones induced DNA damage in human ear canal hair follicle cells. *Electromagn Biol Med*. 2018;37:66–75.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

71. Lai H. Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields. *Electromagn Biol Med*. 2021;40:264–73.

[Article](#) [Google Scholar](#)

72. Yakymenko I, Tsybulin O, Sidorik E, Henshel D, et al. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med*. 2016;35:186–202.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

73. Barnes FS, Greenebaum B. The effects of weak magnetic fields on radical pairs. *Bioelectromagnetics*. 2015;36:45–54.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

74. Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Margaritis LH. Mechanism for action of electromagnetic fields on cells. *Biochem Biophys Res Commun*. 2002;298:95–102.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

75. Belyaev I. Biophysical mechanisms for nonthermal microwave effects. In: Markov MS, editor. *Electromagnetic fields in biology and medicine*. Boca Raton, London, New York: CRC Press; 2015. p. 49–68.

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/b18148-9/biophysical-mechanisms-nonthermal-microwave-effects-marko-markov>.

[Google Scholar](#)

76. Friedman J, Kraus S, Hauptman Y, Schiff Y, Seger R. Mechanism of short-term ERK activation by electromagnetic fields at mobile phone frequencies. *Biochem J*. 2007;405:559–68.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

77. Inoue M, Sato EF, Nishikawa N, Park A-M, et al. Mitochondrial generation of reactive oxygen species and its role in aerobic life. *Curr Med Chem*. 2003;10:2495–505.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

78. Yakymenko I, Burlaka A, Tsybulin I, Brieva I, et al. Oxidative and mutagenic effects of low intensity GSM 1800 MHz microwave radiation. *Exp Oncol*. 2018;40:282–7.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

79. Burlaka A, Tsybulin O, Sidorik E, Lukin S, et al. Overproduction of free radical species in embryonic cells exposed to low intensity radiofrequency radiation. *Exp Oncol*. 2013;35:219–25.

[CAS](#) [Google Scholar](#)

80. Alkis ME, Bilgin HM, Akpolat V, Dasdag S, et al. Effect of 900-, 1800-, and 2100-MHz radiofrequency radiation on DNA and oxidative stress in brain. *Electromagn Bio Med*. 2019;38:32–47.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

81. Ding S-S, Sun P, Zhang Z, Liu X, et al. Moderate dose of trolox preventing the deleterious effects of Wi-fi radiation on spermatozoa in vitro through reduction of oxidative stress damage. *Chin Med J*. 2018;131:402–12.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

82. Khalil AM, Gagaa MH, Alshamali AM. 8-Oxo-7, 8-dihydro-2'-deoxyguanosine as a biomarker of DNA damage by mobile phone radiation. *Hum Exp Toxicol*. 2012;31:734–40.

[Article](#) [Google Scholar](#)

83. Xu S, Zhou Z, Zhang L, Yu Z, et al. Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation induces oxidative damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons. *Brain Res*. 2010;1311:189–96.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

84. Güler G, Tomruk A, Ozgur E, Sahin D, et al. The effect of radiofrequency radiation on DNA and lipid damage in female and male infant rabbits. *Int J Radiat Biol*. 2012;88:367–73.

[Article](#) [Google Scholar](#)

85. Bektas H, Dasdag S, Bektas MS. Comparison of effects of 2.4 GHz Wi-fi and mobile phone exposure on human placenta and cord blood. *Biotechnol Biotechnol Equip*. 2020;34:154–62.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

86. Halliwell B. Biochemistry of oxidative stress. *Biochem Soc Trans*. 2007;35:1147–50.

87. International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC monograph, a review of human carcinogens: radiation. Lyon, France, volume 100D; 2012. p. 1–363. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Radiation-2012>
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
88. Smith MT, Guyton KZ, Gibbons CF, Fritz JM, Portier CJ, Rusyn I, et al. Key characteristics of carcinogens as a basis for organizing data on mechanisms of carcinogenesis. *Environ Health Perspect.* 2016;124:713–21.
[Google Scholar](#)
89. D’Andrea JA, Gandhi OP, Lords JL. Behavioral and thermal effects of microwave radiation at resonant and nonresonant wavelengths. *Radio Sci.* 1977;12:251–6.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
90. D’Andrea JA, Thomas A, Hatcher DJ. Rhesus monkey behavior during exposure to high-peak-power 5.62-GHz microwave pulses. *Bioelectromagnetics.* 1994;15:163–72.
[Article](#) [Google Scholar](#)
91. D’Andrea JA, Gandhi OP, Lords JL, Durney CH, Johnson CC, Astle L. Physiological and behavioral effects of chronic exposure to 2450-MHz microwaves. *J Microw Power.* 1979;14:351–62.
[Article](#) [Google Scholar](#)
92. D’Andrea JA, DeWitt JR, Emmerson RY, Bailey C, Gandhi OP. Intermittent exposure of rats to 2450 MHz microwaves at 2.5 mW/cm²: behavioral and physiological effects. *Bioelectromagnetics.* 1986;7:315–28.
[Article](#) [Google Scholar](#)
93. Belyaev I. Duration of exposure and dose in assessing nonthermal biological effects of microwaves. In: Markov M, editor. *Dosimetry in bioelectromagnetics.* Boca Raton, London, New York: CRC Press; 2017. p. 171–84. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315154572-9/duration-exposure-dose-assessing-nonthermal-biological-effects-microwaves-igor-belyaev>.
[Chapter](#) [Google Scholar](#)
94. Belyaev IY, Alipov YD, Shcheglov VS, Polunin VA, Aizenberg OA. Cooperative response of *Escherichia coli* cells to the resonance effect of millimeter waves at super low intensity. *Electro- Magnetobiol.* 1994;13:53–66.
[Article](#) [Google Scholar](#)
95. Tillmann T, Ernst H, Streckert J, Zhou Y, Taugner F, Hansen V, et al. Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. *Int J Radiat Biol.* 2010;86:529–41.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
96. Lerchl A, Klose M, Grote K, Wilhelm AF, Spathmann O, Fiedler T, et al. Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochem Biophys Res Commun.* 2015;459:585–90.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
97. Baohong W, Jiliang H, Lifan J, et al. Studying the synergistic damage effects induced by 1.8 GHz radiofrequency field radiation (RFR) with four chemical mutagens on human lymphocyte DNA using comet assay in vitro. *Mutat Res.* 2005;578:149–57.
[Article](#) [Google Scholar](#)
98. Baohong W, Lifan J, Lanjuan L, et al. Evaluating the combinative effects on human lymphocyte DNA damage induced by ultraviolet ray C plus 1.8 GHz microwaves using comet assay in vitro. *Toxicol.* 2007;232:311–6.
[Article](#) [Google Scholar](#)
99. Zhang MB, He JL, Jin LF, et al. Study of low-intensity 2450-MHz microwave exposure enhancing the genotoxic effects of mitomycin C using micronucleus test and comet assay in vitro. *Biomed Environ Sci.* 2002;15:283–90.
[Google Scholar](#)
100. Kim JY, Hong SY, Lee YM, et al. In vitro assessment of clastogenicity of mobile-phone radiation (835 MHz) using the alkaline comet assay and chromosomal aberration test. *Environ Toxicol.* 2008;23:319–27.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

101. Lameth J, Arnaud-Cormos D, Lévêque P, et al. Effects of a single head exposure to GSM-1800 MHz signals on the transcriptome profile in the rat cerebral cortex: enhanced gene responses under proinflammatory conditions. *Neurotox Res.* 2020;38:105–23.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

102. López-Martin E, Bregains J, Relova-Quinteiro JL, et al. The action of pulse-modulated GSM radiation increases regional changes in brain activity and c-Fos expression in cortical and subcortical areas in a rat model of picrotoxin-induced seizure proneness. *J Neurosci Res.* 2009;87:1484–99.

[Article](#) [Google Scholar](#)

103. Carballo-Quintás M, Martínez-Silva I, Cardarso-Suárez C, et al. A study of neurotoxic biomarkers, c-fos and GFAP after acute exposure to GSM radiation at 900 MHz in the picrotoxin model of rat brains. *Neurotoxicology.* 2011;32:478–94.

[Article](#) [Google Scholar](#)

104. Kostoff RN, Heroux P, Aschner M, Tsatsakis A. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicol Lett.* 2020;323:35–40.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

105. Neufeld E, Kuster N. Systematic derivation of safety limits for time-varying 5G radiofrequency exposure based on analytical models and thermal dose. *Health Phys.* 2018;115:705–11.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

106. Panagopoulos DJ, Karabaarbounis A, Yakymenko I, Chrousos GP. Human-made electromagnetic fields: ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (review). *Int J Oncol.* 2021;59(92). <https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272>.

107. Pakhomov AG, Murphy MB. Comprehensive review of the research on biological effects of pulsed radiofrequency radiation in Russia and the former Soviet Union. In: Lin JC, editor. *Advances in electromagnetic fields in living system*, vol. 3. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2000. p. 265–90. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-4203-2_7.

[Chapter](#) [Google Scholar](#)

108. Blackman CF. Cell phone radiation: evidence from ELF and RF studies supporting more inclusive risk identification and assessment. *Pathophysiology.* 2009;16:205–16.

[Article](#) [Google Scholar](#)

109. Food and Drug Administration (FDA). Review of published literature between 2008 and 2018 of relevance to radiofrequency radiation and cancer; 2020. Available at <https://www.fda.gov/media/135043/download>

[Google Scholar](#)

110. Zada G, Bond AE, Wang Y-P, Giannotta SL, Deapne D. Incidence trends in the anatomic location of primary malignant brain tumors in the United States:1992-2006. *World Neurosurg.* 2012;77:518–24.

[Article](#) [Google Scholar](#)

111. Philips A, Henshaw DL, Lamburn G, O’Carroll MJ. Brain Tumours: rise in Glioblastoma Multiforme incidence in England 1995-2015 suggests an adverse environmental or lifestyle factor. *J Environ Public Health.* 2018;7910754. <https://doi.org/10.1155/2018/7910754>.

112. Hardell L, Carlberg M. Mobile phones, cordless phones and rates of brain tumors in different age groups in the Swedish National Inpatient Register and the Swedish cancer register during 1998-2015. *PLoS One.* 2017;12:e0185461. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185461>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

113. Johansen C, Boice J, McLaughlin J, Olsen J. Cellular telephones and cancer--a nationwide cohort study in Denmark. *J Natl Cancer Inst.* 2001;93:203–7.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

114. Söderqvist F, Carlberg M, Hardell L. Review of four publications on the Danish cohort study on mobile phone subscribers and risk of brain tumors. *Rev Environ Health.* 2012;27:51–8.

[Article](#) [Google Scholar](#)

115. Hardell L, Carlberg M, Söderqvist F, Hansson MK. Pooled analysis of case-control studies on acoustic neuroma diagnosed 1997-2003 and 2007-2009 and use of mobile and cordless phones. *Int J Oncol.* 2013;43:1036–44.

[Article](#) [Google Scholar](#)

116. Hardell L, Carlberg M. Mobile phone and cordless phone use and the risk for glioma – analysis of pooled case-control studies in Sweden, 1997-2003 and 2007-2009. *Pathophysiology.* 2015;22:1–13.

[Article](#) [Google Scholar](#)

117. Interphone Study Group. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Int J Epidemiol*. 2010;39:675–94.
[Article](#) [Google Scholar](#)
118. Coureau G, Bouvier G, Lebaillly P, Fabbro-Peray P, Gruber A, Leffondre K, et al. Mobile phone use and brain tumours in the CERENAT case-control study. *Occup Environ Med*. 2014;71:514–22.
[Article](#) [Google Scholar](#)
119. Interphone Study Group. Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Cancer Epidemiol*. 2011;35:453–64.
[Article](#) [Google Scholar](#)
120. Hardell L, Carlberg M. Use of mobile and cordless phones and survival of patients with glioma. *Neuroepidemiology*. 2013;40:101–8.
[Article](#) [Google Scholar](#)
121. Akhavan-Sigari R, Baf MM, Ariabod V, Rohde V, Rahighi S. Connection between cell phone use, p53 gene expression in different zones of glioblastoma multiforme and survival prognoses. *Rare Tumors*. 2014;6:5350. <https://doi.org/10.4081/rt.2014.5350>.
[Article](#) [Google Scholar](#)
122. Moon IS, Kim BG, Kim J, Lee JD, Lee WS. Association between vestibular schwannomas and mobile phone use. *Tumour Biol*. 2014;35:581–7.
[Article](#) [Google Scholar](#)
123. Sato Y, Akiba S, Kubo O, Yamaguchi N. A case-case study of mobile phone use and acoustic neuroma risk in Japan. *Bioelectromagnetics*. 2011;32:85–93.
[Article](#) [Google Scholar](#)
124. Pettersson D, Mathiesen T, Prochazka M, Bergenheim T, Florentzson R, Harder H, et al. Long-term mobile phone use and acoustic neuroma risk. *Epidemiology*. 2014;25:233–41.
[Article](#) [Google Scholar](#)
125. Schoemaker MJ, Swerdlow AJ, Ahlbom A, Avineni A, Blaasaas KG, Cardis E, et al. Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the Interphone case-control study in five north European countries. *Br J Cancer*. 2005;93:842–8.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
126. Momoli F, Siemiatycki J, McBride ML, Parent ME, Richardson L, Bedard D, et al. Probabilistic multiple-bias modelling applied to the Canadian data from the INTERPHONE study of mobile phone use and risk of glioma, meningioma, acoustic neuroma, and parotid gland tumors. *Am J Epidemiol*. 2017;186:885–93.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
127. Luo J, Deziel NC, Huang H, Chen Y, Ni X, Ma S, et al. Cell phone use and risk of thyroid cancer: a population-based case-control study in Connecticut. *Ann Epidemiol*. 2019;29:39–45.
[Article](#) [Google Scholar](#)
128. Luo J, Li H, Deziel NC, Huang H, Zhao N, Ma S, et al. Genetic susceptibility may modify the association between cell phone use and thyroid cancer: a population-based case-control study in Connecticut. *Environ Res*. 2020;182:109013. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109013>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
129. Carlberg M, Hedendahl L, Ahonen M, Koppel T, Hardell L. Increasing incidence of thyroid cancer in the Nordic countries with main focus on Swedish data. *BMC Cancer*. 2016;16:426. <https://doi.org/10.1186/s12885-016-2429-4>.
[Article](#) [Google Scholar](#)
130. Carlberg M, Koppel T, Hedendahl LK, Hardell L. Is the increasing incidence of thyroid cancer in the Nordic countries caused by use of mobile phones? *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(23):9129. <https://doi.org/10.3390/ijerph17239129>.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
131. Shih YW, Hung CS, Huang CC, Chou KR, Niu SF, et al. The association between smartphone use and breast cancer risk among Taiwanese women: a case-control study. *Cancer Manag Res*. 2020;12:10799–807. <https://doi.org/10.2147/CMAR.S267415>.
[Article](#) [Google Scholar](#)
132. Gandhi OP, Lazzi G, Furse CM. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. *IEEE Trans Microw Theory Tech*. 1996;44:1884–97.
[Article](#) [Google Scholar](#)

133. Gandhi OP, Morgan L, de Salles AA, Han YY, Herberman RB, Davis DL. Exposure limits: the underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children. *Electromagn Biol Med*. 2012;31:34–51.

[Article](#) [Google Scholar](#)

134. Fernández-Rodríguez CE, de Salles AA, Davis DL. Dosimetric simulations of brain absorption of mobile phone radiation– the relationship between psSAR and age. *IEEE Access*. 2015;3:2425–30.

[Article](#) [Google Scholar](#)

135. Fernández-Rodríguez C, de Salles AA. On the sensitivity of the skull thickness for the SAR assessment in the intracranial tissues, 2016 IEEE MTT-S Latin America microwave conference (LAMC); 2016. <https://doi.org/10.1109/LAMC.2016.7851256>.

[Book](#) [Google Scholar](#)

136. Fernández C, de Salles AA, Sears ME, Morris RD, Davis DL. Absorption of wireless radiation in the child versus adult brain and eye from cell phone conversation or virtual reality. *Environ Res*. 2018;167:694–9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.05.013>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

137. Christ A, Gosselin MC, Christopoulou M, Kühn S, Kuster N. Age-dependent tissue-specific exposure of cell phone users. *Phys Med Biol*. 2010;55:1767–83.

[Article](#) [Google Scholar](#)

138. Foster KR, Chou CK. Response to "children absorb higher doses of radio frequency electromagnetic radiation from mobile phones than adults" and "yes the children are more exposed to radiofrequency energy from mobile telephones than adults". *IEEE Access*. 2016;4:5322–6.

[Article](#) [Google Scholar](#)

139. de Salles AA, Bulla G, Fernández-Rodríguez CE. Electromagnetic absorption in the head of adults and children due to mobile phone operation close to the head. *Electromagn Biol Med*. 2006;25:349–60.

[Article](#) [Google Scholar](#)

140. Peyman A, Gabriel C, Gran EH, Vermeeren G, Martens L. Variation of the dielectric properties of tissues with age: the effect on the values of SAR in children when exposed to walkie-talkie devices. *Phys Med Biol*. 2009;2009(54):227–41.

[Article](#) [Google Scholar](#)

141. Blondin JP, Nguyen DH, Sbeghen J, Goulet D, et al. Human perception of electric fields and ion currents associated with high-voltage DC transmission lines. *Bioelectromagnetics*. 1996;17:230–41.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

142. Leitgeb N, Schroettner J. Electric current perception study challenges electric safety limits. *J Med Eng Technol*. 2002;26:168–72.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

143. Leitgeb N, Schroettner J, Cech RJ. Electric current perception of children: the role of age and gender. *Med. Eng Technol*. 2006;30:306–9.

[CAS](#) [Google Scholar](#)

144. Leitgeb N, Schröttner J, Cech R. Perception of ELF electromagnetic fields: excitation thresholds and inter-individual variability. *Health Phys*. 2007;92:591–5.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

145. McCarty DE, Carrubba S, Chesson AL, Frilot C, et al. Electromagnetic hypersensitivity: evidence for a novel neurological syndrome. *Int J Neurosci*. 2011;121:670–6.

[Article](#) [Google Scholar](#)

146. Hinrikus H, Parts M, Lass J, Tuulik V. Changes in human EEG caused by low level modulated microwave stimulation. *Bioelectromagnetics*. 2004;2004(25):431–40.

[Article](#) [Google Scholar](#)

147. Hinrikus H, Bachmann M, Lass J, et al. Effect of low frequency modulated microwave exposure on human EEG: individual sensitivity. *Bioelectromagnetics*. 2008;29:527–38.

[Article](#) [Google Scholar](#)

148. Mueller CH, Krueger H, Schierz C. Project NEMESIS: perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment). *Bioelectromagnetics*. 2002;23:26–36.

[Article](#) [Google Scholar](#)

149. Legros A, Beuter A. Individual subject sensitivity to extremely low frequency magnetic field. *Neurotoxicology*. 2006;27:534–46.

[Article](#) [Google Scholar](#)

150. Kimata H. Microwave radiation from cellular phones increases allergen-specific IgE production. *Allergy*. 2005;60:838–9.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

151. Rea WJ, Pan Y, Fenyves EJ, Sujisawa I, et al. Electromagnetic field sensitivity. *J Bioelectricity*. 1991;10:241–56.

[Article](#) [Google Scholar](#)

152. Belpomme D, Irigaray P. Electrohypersensitivity as a newly identified and characterized neurologic pathological disorder: how to diagnose, treat, and prevent it. *Int J Mol Sci*. 2020;21:1915. <https://doi.org/10.3390/ijms21061915>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

153. Stein Y, Udasin IG. Electromagnetic hypersensitivity (EHS, microwave syndrome) - review of mechanisms. *Environ Res*. 2020;186:109445. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109445>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

154. Hagström M, Auranen J, Ekman R. Electromagnetic hypersensitive Finns: symptoms, perceived sources and treatments, a questionnaire study. *Pathophysiology*. 2013;20:117–22.

[Article](#) [Google Scholar](#)

155. Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, et al. European EMF guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illness. *Rev Environ Health*. 2016;31:363–97.

[Article](#) [Google Scholar](#)

156. Austrian Medical Association. Guideline of the Austrian medical association for the diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses (EMF syndrome); 2012. Available at <https://vagbrytaren.org/Guideline%20%20AG-EMF.pdf>

[Google Scholar](#)

157. Hardell L, Koppel T. Electromagnetic hypersensitivity close to mobile phone base stations - a case study in Stockholm, Sweden. *Rev Environ Health*. 2022. <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0169>.

158. Havas M. Radiation from wireless technology affects the blood, the heart, and the autonomic nervous system. *Rev Environ Health*. 2013;2013(28):75–84.

[Google Scholar](#)

159. Leitgeb N, Schröttner J. Electrosensitivity and electromagnetic hypersensitivity. *Bioelectromagnetics*. 2003;24:387–94.

[Article](#) [Google Scholar](#)

160. Deshmukh PS, Banerjee BD, Abegaonkar MP, Megha K, et al. Effect of low level microwave radiation exposure on cognitive function and oxidative stress in rats. *Indian J Biochem Biophys*. 2013;50:114–9.

[CAS](#) [Google Scholar](#)

161. Everaert J, Bauwens D. A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrows (*Passer domesticus*). *Electromagn Biol Med*. 2007;26:63–72.

[Article](#) [Google Scholar](#)

162. Megha K, Deshmukh PS, Banerjee BD, et al. Microwave radiation induced oxidative stress, cognitive impairment and inflammation in brain of Fischer rats. *Indian J Exp Biol*. 2012;50:889–96.

[CAS](#) [Google Scholar](#)

163. Narayanan SN, Kumar RS, Potu BK, Nayak S. Effect of radio-frequency electromagnetic radiations (RF-EMR) on passive avoidance behaviour and hippocampal morphology in Wistar rats. *Ups J Med Sci*. 2010;115:91–6.

[Article](#) [Google Scholar](#)

164. Narayanan SN, Kumar RS, Paval J, Kedage V, et al. Analysis of emotionality and locomotion in radio-frequency electromagnetic radiation exposed rats. *Neurol Sci*. 2013;34:1117–24.

[Article](#) [Google Scholar](#)

165. Narayanan SN, Kumar RS, Kedage V, Nalini K, et al. Evaluation of oxidant stress and antioxidant defense in discrete brain regions of rats exposed to 900 MHz radiation. *Bratisl Lek Listy*. 2014;115:260–6.

[CAS](#) [Google Scholar](#)

166. Cammaerts MC, De Doncker P, Patris X, Bellens F, Rachidi Z, Cammaerts D. GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues. *Electromagn Biol Med*. 2012;31:151–65.

[Article](#) [Google Scholar](#)

167. Balmori A, Hallberg O. The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*): a possible link with electromagnetic radiation. *Electromagn Biol Med*. 2007;26:141–51.

[Article](#) [Google Scholar](#)

168. Balmori A. Mobile phone mast effects on common frog (*Rana temporaria*) tadpoles: the city turned into a laboratory. *Electromagn Biol Med*. 2010;29:31–5.

[Article](#) [Google Scholar](#)

169. Aldad TS, Gan G, Gao XB, Taylor HS. Fetal radiofrequency radiation exposure from 800-1900 MHz-rated cellular telephones affects neurodevelopment and behavior in mice. *Sci Rep*. 2012;2:312. <https://doi.org/10.1038/srep00312>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

170. Nittby H, Grafström G, Tian DP, Malmgren L, et al. Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation. *Bioelectromagnetics*. 2008;29:219–32.

[Article](#) [Google Scholar](#)

171. Ntzouni MP, Stamatakis A, Stylianopoulou F, Margaritis LH. Short-term memory in mice is affected by mobile phone radiation. *Pathophysiology*. 2011;18:193–9.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

172. Saikhedkar N, Bhatnagar M, Jain A, Sukhwai P, et al. Effects of mobile phone radiation (900 MHz radiofrequency) on structure and functions of rat brain. *Neurol Res*. 2014;36:1072–9.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

173. Rubin GJ, Nieto-Hernandez R, Wessely S. Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (formerly 'electromagnetic hypersensitivity'): an updated systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics*. 2010;31:1–11.

[Google Scholar](#)

174. Markova E, Hillert L, Malmgren L, Persson BRR, Belyaev IY. Microwaves from GSM mobile telephones affect 53BP1 and gamma-H2AX foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons. *Environ Health Perspect*. 2005;113:1172–7.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

175. Markova E, Malmgren LO, Belyaev IY. Microwaves from mobile phones inhibit 53BP1 focus formation in human stem cells more strongly than in differentiated cells: possible mechanistic link to cancer risk. *Environ Health Perspect*. 2010;118:394–9.

[Article](#) [Google Scholar](#)

176. Belyaev IY, Markova E, Hillert L, Malmgren LOG, Persson BRR. Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes. *Bioelectromagnetics*. 2009;2009(30):129–41.

[Article](#) [Google Scholar](#)

177. Gulati S, Kosik P, Durdik M, Skorvaga M, et al. Effects of different mobile phone UMTS signals on DNA, apoptosis and oxidative stress in human lymphocytes. *Environ Pollut*. 2020;267:115632. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115632>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

178. Dieudonné M. Does electromagnetic hypersensitivity originate from placebo responses? Indications from a qualitative study. *Bioelectromagnetics*. 2016;37:14–24.

[Article](#) [Google Scholar](#)

179. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys*. 2002;82:540–8.

[Article](#) [Google Scholar](#)

180. World Health Organization (WHO). Electromagnetic fields and public health. Electromagnetic hypersensitivity; 2005.

<https://web.archive.org/web/20220423095028/https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/el-hsensitivity>

[Google Scholar](#)

181. Havas M. Electrohypersensitivity (EHS) is an environmentally-induced disability that requires immediate attention. *J Sci Discov*. 2019;3(1):jsd18020. <https://doi.org/10.24262/jsd.3.1.18020>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

182. US Environmental Protection Agency (US EPA). A review of the reference dose (RfD) and reference concentration (RfC) process. Risk assessment forum. EPA/630/P-02/002F. Washington, DC; 2002. Available at: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-12/documents/rfd-final.pdf>

183. International Council for Harmonization (ICH). Impurities: guidelines for residual solvents Q3C(R7); 2018. Available at: <https://www.pmda.go.jp/files/000231003.pdf>

[Google Scholar](#)

184. Dankovic DA, Naumann BD, Maier A, Dourson ML, Levy LS. The scientific basis of uncertainty factors used in setting occupational exposure limits. *J Occup Environ Hyg*. 2015;12:S55–68.

[Article](#) [Google Scholar](#)

185. Uche UI, Naidenko OV. Development of health-based exposure limits for radiofrequency radiation from wireless devices using a benchmark dose approach. *Environ Health*. 2021;20:84. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00768-1>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

186. Peleg M, Naativ O, Richter ED. Radio frequency radiation-related cancer: assessing causation in the occupational/military setting. *Environ Res*. 2018;163:123–33.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

187. Gong Y, Capstick M, McCormick DL, Gauger JR, Horn T, Wilson P, et al. Life time dosimetric assessment for mice and rats exposed to cell phone radiation. *IEEE Trans Electromagn Compat*. 2017;59:1798–808.

[Article](#) [Google Scholar](#)

188. Alvarez-Buylla A, Lim DA. For the long run: maintaining germinal niches in the adult brain. *Neuron*. 2004;41:683–6.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

189. Levitt BB, Lai HC, Manville AM. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 1. Rising ambient EMF levels in the environment. *Rev Environ Health*. 2021. <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0026>.

190. Levitt BB, Lai HC, Manville AM. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF. *Rev Environ Health*. 2021. <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0050>.

191. Moller A, Sagasser S, Wiltshko W, Schierwater B. Retinal cryptochrome in a migratory passerine bird: a possible transducer for the avian magnetic compass. *Naturwissenschaften*. 2004;91:585–8.

[Article](#) [Google Scholar](#)

192. Heyers D, Manns M, Luksch H, Güntürkün O, Mouritsen H. A visual pathway links brain structures active during magnetic compass orientation in migratory birds. *PLoS One*. 2007;2:e937. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000937>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

193. Collett TS, Barron J. Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. *Nature*. 1994;386:137–40.

[Article](#) [Google Scholar](#)

194. Holland RA, Kirschvink JL, Doak TG, Wikelski M. Bats use magnetoreception to detect the earth's magnetic field. *PLoS One*. 2008;3:e1676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001676>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

195. Putman NF, Scanlan MM, Billman EJ, O'Neil JP, Couture RB, Quinn TP, et al. An inherited magnetic map guides ocean navigation in juvenile pacific salmon. *Curr Biol*. 2014;24:446–50.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

196. Putman NF, Williams CR, Gallagher EP, Dittman AH. A sense of place: pink salmon use a magnetic map for orientation. *J Exp Biol*. 2020;223:218735. <https://doi.org/10.1242/jeb.218735>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

197. Quinn TP, Merrill RT, Brannon EL. Magnetic field detection in sockeye salmon. *J Exp Zool*. 1981;217:137–42.

[Article](#) [Google Scholar](#)

198. Kalmijn AJ. Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. *Science*. 1982;198(218):916–8.

[Article](#) [Google Scholar](#)

199. Engels S, Schneider NL, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, Michalik A, et al. Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature*. 2014;509:353–6.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

200. Pakhomov A, Bojarinova J, Cherbunin R, Chetverikova R, Grigoryev PS, Kavokin K, et al. Very weak oscillating magnetic field disrupts the magnetic compass of songbird migrants. *J R Soc Interface*. 2017;14:20170364. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0364>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

201. Schwarze S, Schneibder NL, Reichl T, Dreyer D, Lefeldt N, Engels S, et al. Weak broadband electromagnetic fields are more disruptive to magnetic compass orientation in a night-migratory songbird (*Erithacus rubecula*) than strong narrow-band fields. *Front Behav Neurosci*. 2016;10:55. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00055>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

202. Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, Nießner C, Ritz T, Wiltschko W. Magnetoreception in birds: the effect of radio-frequency fields. *J R Soc Interface*. 2015;12:20141103. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.1103>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

203. Landler L, Painter MS, Youmans PW, Hopkins WA, Phillips JB. Spontaneous magnetic alignment by yearling snapping turtles: rapid association of radio frequency dependent pattern of magnetic input with novel surroundings. *PLoS One*. 2015;10:e0124728. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124728>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

204. Putman NF, Meinke AM, Noakes DL. Rearing in a distorted magnetic field disrupts the 'map sense' of juvenile steelhead trout. *Biol Lett*. 2014;10:20140169. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0169>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

205. Sharma VP, Kumar NR. Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations. *Curr Sci*. 2010;98:1376–8.

[Google Scholar](#)

206. Odemer R, Odemer F. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success. *Sci Total Environ*. 2019;661:553–62.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

207. Gabriel C, Lau RW, Gabriel S. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Phys Med Biol*. 1996;41:2251–69.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

208. Gandhi O, Riaz A. Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications. *IEEE Trans Microw Theory Tech*. 1986;34:228–35.

[Article](#) [Google Scholar](#)

209. Thielens A, Bell D, Mortimore DB, Greco MK, Martens L, Joseph W. Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 GHz. *Sci Rep*. 2018;8(1):3924. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22271-3>.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

210. Pretz K. Will 5G be bad for our health? *IEEE Spectr*. 2019; <https://spectrum.ieee.org/will-5g-be-bad-for-our-health>.

211. Neufeld E, Carrasco E, Murbach M, Balzano Q, Christ A, Kuster N. Theoretical and numerical assessment of maximally allowable power-density averaging area for conservative electromagnetic exposure assessment above 6 GHz. *Bioelectromagnetics*. 2018;39:617–30.

[Article](#) [Google Scholar](#)

212. Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q. Thermal response of human skin to microwave energy: a critical review. *Health Phys*. 2016;111:528–41.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

213. Anderson RR, Parrish JA. The optics of human skin. *J Invest Dermatol*. 1981;77:13–9.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

214. Meinhardt M, Kerbs R, Anders A, Heinrich U, Tronnier H. Wavelength-dependent penetration depths of ultraviolet radiation in human skin. *J Biomed Opt*. 2008;13:044030. <https://doi.org/10.1117/1.2957970>.

[Article](#) [Google Scholar](#)

215. Pakhomov AG, Akyel Y, Pakhomova ON, Stuck BE, Murphy MR. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: a review of the literature. *Bioelectromagnetics*. 1998;19:393–413.

[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)

216. Belyaev IY, Shcheglov VS, Alipov ED, Ushakov VD. Nonthermal effects of extremely high-frequency microwaves on chromatin conformation in cells in vitro - dependence on physical, physiological, and genetic factors. *IEEE Trans Microw Theory Tech.* 2000;48:2172–9.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
217. Albanese R, Blaschak J, Medina R, Penn J. Ultrashort electromagnetic signals: biophysical questions, safety issues, and medical opportunities. *Aviat Space Environ Med.* 1994;65:A116–20.
[CAS](#) [Google Scholar](#)
218. Oughstun KE. Optimal pulse penetration in Lorentz-model dielectrics using the Sommerfeld and Brillouin precursors. *Opt Express.* 2015;23:26604–16.
[Article](#) [Google Scholar](#)
219. Wood AW. What is the current status of research on mm-wave frequencies? -in relation to health; 2018. <https://slideplayer.com/slide/14592262/>
[Google Scholar](#)
220. Blackman C, Forge S. 5G deployment: state of play in Europe, USA, and Asia. European Parliament; 2019.
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2019/631060/IPOL_IDA\(2019\)631060_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2019/631060/IPOL_IDA(2019)631060_EN.pdf)
[Google Scholar](#)
221. Regel SJ, Gottselig JM, Schuderer J, Tinguely G, et al. Pulsed radio frequency radiation affects cognitive performance and the waking electroencephalogram. *NeuroReport.* 2007;18:803–7.
[Article](#) [Google Scholar](#)
222. Thomas JR, Schrot J, Banvard RA. Comparative effects of pulsed and continuous-wave 2.8-GHz microwaves on temporally defined behavior. *Bioelectromagnetics.* 1982;3:227–35.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
223. Creighton MO, Larsen LE, Stewart-DeHaan PJ, Jacobi JH, et al. In vitro studies of microwave-induced cataract. II. Comparison of damage observed for continuous wave and pulsed microwaves. *Exp Eye Res.* 1987;45:357–73.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
224. Czerska EM, Elson EC, Davis CC, Swicord ML, Czerski P. Effects of continuous and pulsed 2450-MHz radiation on spontaneous lymphoblastoid transformation of human lymphocytes in vitro. *Bioelectromagnetics.* 1992;13:247–59.
[Article](#) [CAS](#) [Google Scholar](#)
225. El Khoueiry C, Moretti D, Renom R, Camera F, Orlacchio R, Garenne A, et al. Decreased spontaneous electrical activity in neuronal networks exposed to radiofrequency 1,800 MHz signals. *J Neurophysiol.* 2018;120:2719–29.
[Article](#) [Google Scholar](#)
226. Mohammed HS, Fahmy HM, Radwan NM, Elsayed AA. Non-thermal continuous and modulated electromagnetic radiation fields effects on sleep EEG of rats. *J Adv Res.* 2013;4:181–7.
[Article](#) [Google Scholar](#)
227. Blank M, Havas M, Kelley E, Lai H, Moskowitz J. International appeal: scientists call for protection from non-ionizing electromagnetic field exposure. *Eur J Oncol Environ Health.* 2015;20:180–2 Available from: <https://mattioli1885journals.com/index.php/EJOEH/article/view/4971>.
[Google Scholar](#)
228. International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC monograph, a review of human carcinogens: arsenic, metals, Fibres, and dusts. Lyon, France, volume 100C; 2012. p. 1–527.
<https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Arsenic-Metals-Fibres-And-Dusts-2012>
[Google Scholar](#)
229. Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. IEEE Std C95.1™. New York: IEEE; 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8859679>
[Google Scholar](#)
230. Bandara P, Carpenter DO. Planetary electromagnetic pollution: it is time to assess its impact. *Lancet Planet Health.* 2018;2:e512–4. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30221-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30221-3).
[Article](#) [Google Scholar](#)

También puedes ver:

Nota de prensa de la ICBE-EMF en castellano e inglés: https://escuelasaludable.org/wp-content/uploads/2021/11/ICBE-EMF.oct_2022.pdf

Más información complementaria, consultar el artículo original en inglés: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-022-00900-9>