

## 18 RESUMEN Y RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS POSTERIORES

En la presente monografía sobre Criterios de Salud Ambiental (EHC) se abordan los posibles efectos en la salud de la exposición a campos eléctricos y magnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF). En ella se examinan las características físicas de los campos ELF, así como las fuentes de exposición y la medición. Sin embargo, sus principales objetivos son la revisión de la literatura científica sobre los efectos biológicos de la exposición a campos de ELF, a fin de evaluar cualquier riesgo para la salud proveniente de la exposición a dichos campos y utilizar esta evaluación de los riesgos de salud en la formulación de recomendaciones a las autoridades nacionales sobre los programas de protección de la salud.

Las frecuencias bajo consideración están comprendidas en el rango por encima de 0 Hz a 100 kHz. La inmensa mayoría de los estudios se han realizado sobre campos magnéticos en frecuencia de energía (50 ó 60 Hz) y muy pocos utilizando campos eléctricos en frecuencia de energía. Además, se han realizado varios estudios sobre campos de muy baja frecuencia (VLF, 3–30 kHz), campos magnéticos de gradientes invertidos utilizados en la imaginología de resonancia magnética y campos de VLF más débiles que emiten los monitores de visualización y los televisores.

En este capítulo se resumen las principales conclusiones y recomendaciones de cada sección, así como las conclusiones globales del proceso de evaluación de los riesgos de salud. Los términos utilizados en esta monografía para describir el peso de la evidencia para un resultado de salud determinado son los siguientes. Se dice que la evidencia es “limitada” cuando se reduce a un solo estudio o cuando hay cuestiones por resolver en relación con el diseño, la realización o la interpretación de varios estudios. La evidencia es “insuficiente” cuando no se puede interpretar que los estudios demuestran la presencia o la ausencia de un efecto debido a limitaciones cualitativas o cuantitativas importantes, o cuando no se dispone de datos.

También se encontraron brechas fundamentales en los conocimientos, y en la sección titulada “Recomendaciones para la investigación” se han resumido las investigaciones necesarias para llenar esas brechas.

### 18.1 Resumen

#### 18.1.1 Fuentes, mediciones y exposiciones

Donde quiera que se genera, transmite o distribuye electricidad en tendidos o cables eléctricos o se utiliza en aparatos eléctricos existen campos eléctricos y magnéticos. Dado que el uso de la electricidad forma parte integrante de nuestro sistema de vida moderno, estos campos están omnipresentes en nuestro ambiente.

La unidad de intensidad de campo eléctrico es el voltio por metro ( $V m^{-1}$ ) o el kilovoltio por metro ( $kV m^{-1}$ ) y para los campos magnéticos la densidad de flujo se mide en teslas (T), o más habitualmente en militeslas (mT) o en microteslas ( $\mu T$ ).

La exposición residencial a campos magnéticos en frecuencia de energía no registra grandes variaciones en todo el mundo. La media geométrica del campo magnético en los hogares oscila entre 0,025 y 0,07  $\mu\text{T}$  en Europa y entre 0,055 y 0,11  $\mu\text{T}$  en los Estados Unidos. Los valores medios de los campos eléctricos entre el hogar son del orden de varias decenas de voltios por metro. En las proximidades de determinados aparatos eléctricos, los valores instantáneos del campo magnético pueden llegar a ser de unos pocos cientos de microteslas. Cerca de las líneas de energía, los campos magnéticos llegan a ser de alrededor de 20  $\mu\text{T}$  y los campos eléctricos de varios miles de voltios por metro.

Son pocos los niños que tienen una exposición residencial promedio en el tiempo a campos magnéticos de 50 ó 60 Hz superior a los niveles asociados con un aumento de la incidencia de la leucemia infantil (ver la sección 18.1.10). Entre el 1% y el 4% tienen una exposición media superior a 0,3  $\mu\text{T}$  y sólo del 1% al 2% tienen una exposición media que supera los 0,4  $\mu\text{T}$ .

La exposición ocupacional, aunque predominantemente debido a los campos en frecuencia de energía, también puede incluir otras frecuencias. Se ha encontrado que el promedio de la exposición a campos magnéticos en el lugar de trabajo para las ocupaciones relacionadas con la electricidad es superior al de otros trabajos tales como el trabajo de oficina, con valores que oscilan entre 0,4–0,6  $\mu\text{T}$  para los electricistas y los ingenieros eléctricos y alrededor de 1,0  $\mu\text{T}$  en los trabajadores de líneas de energía, siendo máxima la exposición de los soldadores, los maquinistas de ferrocarril y los operadores de máquinas de coser (por encima de 3  $\mu\text{T}$ ). Las exposiciones máximas a campos magnéticos en el lugar de trabajo pueden llegar a ser de alrededor de 10 mT y están asociadas de manera invariable con la presencia de conductores portadores de corrientes altas. En la industria del suministro de energía eléctrica, los trabajadores pueden estar expuestos a campos eléctricos de hasta 30 kV  $\text{m}^{-1}$ .

### **18.1.2 Campos eléctricos y magnéticos dentro del cuerpo**

La exposición a campos eléctricos y magnéticos externos de frecuencias extremadamente bajas induce campos eléctricos y corrientes dentro del cuerpo. La dosimetría describe la relación entre los campos externos y el campo eléctrico y la densidad de corriente inducidos en el cuerpo, u otros parámetros asociados con la exposición a estos campos. El campo eléctrico y la densidad de corriente inducidos localmente son de especial interés debido a que están relacionados con la estimulación de los tejidos excitables, tales como los nervios y los músculos.

Los cuerpos de las personas y animales perturban significativamente la distribución espacial de un campo eléctrico de ELF. En bajas frecuencias, el cuerpo es un buen conductor y las líneas del campo perturbado externas al cuerpo son casi perpendiculares a la superficie de éste. En la superficie del cuerpo expuesto se inducen cargas oscilantes, que a su vez inducen corrientes dentro del cuerpo. Las características fundamentales de la

dosimetría para la exposición de las personas a campos eléctricos ELF son las siguientes:

- El campo eléctrico dentro del cuerpo suele ser de cinco a seis órdenes de magnitud inferior al campo eléctrico externo.
- Cuando la exposición es fundamentalmente al campo vertical, la dirección predominante de los campos inducidos también es vertical.
- Para un campo eléctrico externo determinado, los campos inducidos más fuertes corresponden al cuerpo humano en perfecto contacto con el suelo a través de los pies (eléctricamente aterrado) y los campos inducidos más débiles corresponden al cuerpo aislado del suelo (en “espacio libre”).
- El flujo total de corriente en un cuerpo en perfecto contacto con el suelo está determinado por el tamaño y la forma del cuerpo (incluida la postura) antes que la conductividad de los tejidos.
- La distribución de las corrientes inducidas a través de los diversos órganos y tejidos está determinada por la conductividad de dichos tejidos.
- La distribución de un campo eléctrico inducido también es afectada por la conductividad, pero menos que la corriente inducida.
- También hay un fenómeno independiente en el que la corriente se produce en el cuerpo por medio del contacto con un objeto conductor situado en un campo eléctrico.

Para los campos magnéticos, la permeabilidad de los tejidos es igual a la del aire, de manera que el campo en un tejido es igual al campo externo. Los cuerpos de las personas y de los animales no perturba significativamente el campo. La principal interacción de los campos magnéticos corresponde a la inducción de Faraday de campos eléctricos y las densidades de corriente asociadas en los tejidos conductores. Las características fundamentales de la dosimetría para la exposición de los seres humanos a campos magnéticos de ELF son las siguientes:

- El campo eléctrico y la corriente inducidos dependen de la orientación del campo externo. Los campos inducidos en el cuerpo considerado en conjunto son máximos cuando el campo está alineado de la parte anterior a la posterior del organismo, pero en algunos órganos concretos los valores máximos corresponden al campo alineado de un costado al otro.
- Los campos eléctricos más débiles son inducidos por un campo magnético orientado a lo largo del eje vertical del cuerpo.
- Para una intensidad y una orientación determinadas del campo magnético, se inducen campos eléctricos más altos en los cuerpos de mayor tamaño.

- La distribución del campo eléctrico inducido es afectada por la conductividad de los diversos órganos y tejidos. Éstos tienen un efecto limitado en la distribución de la densidad de corriente inducida.

### **18.1.3 Mecanismos biofísicos**

Se examina la posibilidad de diversos mecanismos de interacción directa e indirecta propuestos para los campos eléctricos y magnéticos de ELF, en particular si una “señal” generada en un proceso biológico por la exposición a un campo se puede discriminar del ruido aleatorio inherente, y si el mecanismo desafía los principios científicos y los conocimientos científicos actuales. Muchos mecanismos se hacen posibles solamente en campos por encima de una intensidad determinada. No obstante, la ausencia de mecanismos posibles identificados no excluye la posibilidad de efectos en la salud incluso con niveles de campo muy bajos, siempre que se sigan los principios científicos básicos.

Entre los numerosos mecanismos propuestos para la interacción directa de los campos dentro del cuerpo humano, hay tres que destacan más que los otros por su potencial actuación a niveles más bajos del campo: los campos eléctricos inducidos en redes neurales, los pares de radicales y la magnetita.

Los campos eléctricos inducidos en los tejidos por la exposición a campos eléctricos o magnéticos de ELF estimulan directamente las fibras nerviosas mielinizadas aisladas de una forma posible desde el punto de vista biofísico cuando la intensidad del campo interno es superior a algunos voltios por metro. La transmisión sináptica en las redes neurales, en contraposición a las células aisladas, se puede ver afectada por campos mucho más débiles. Los organismos multicelulares suelen utilizar tal procesamiento de la señal por los sistemas nerviosos para detectar señales ambientales débiles. Para la discriminación en la red neural, se ha propuesto un límite inferior de  $1 \text{ mV m}^{-1}$ , pero de acuerdo con la evidencia actual parecen más probables valores umbral de alrededor de  $10\text{--}100 \text{ mV m}^{-1}$ .

El mecanismo par radical es una manera aceptada en que los campos magnéticos pueden influir en tipos específicos de reacciones químicas, por lo general aumentando las concentraciones de radicales libres reactivos en los campos bajos y reduciéndolas en los campos altos. Este aumento se ha visto en campos magnéticos de menos de  $1 \text{ mT}$ . Existe algunas evidencias que vinculan este mecanismo a la navegación de las aves durante la migración. Sobre una base teórica y debido a que los cambios producidos por los campos magnéticos de ELF y estáticos son similares, se sugiere que es poco probable que los campos en frecuencias de energía muy inferiores al campo geomagnético de unos  $50 \text{ }\mu\text{T}$  tenga mucha importancia biológica.

En los tejidos de los animales y seres humanos se encuentran cristales de magnetita, pequeños cristales ferromagnéticos de óxido de hierro de diversas formas, aunque en cantidades insignificantes. Al igual que los radicales libres, se han relacionado con la orientación y la navegación en los ani-

males migratorios, aunque la presencia de cantidades insignificantes de magnetita en el cerebro humano no confiere la capacidad de detectar el débil campo geomagnético. Los cálculos basados en hipótesis extremas parecen indicar para los efectos de los campos de ELF en los cristales de magnetita un límite inferior de 5  $\mu\text{T}$ .

Otras interacciones biofísicas directas de los campos, tales como la ruptura de enlaces químicos, las fuerzas sobre las partículas cargadas y los diversos mecanismos de “resonancia” de banda estrecha, no parecen explicar de manera verosímil las interacciones en los niveles de campo encontrados en los entornos público y ocupacional.

Con respecto a los efectos indirectos, la carga eléctrica superficial inducida por campos eléctricos puede ser percibida y dar lugar a microchoques dolorosos al tocar un objeto conductor. Se pueden producir corrientes de contacto cuando, por ejemplo, los niños pequeños tocan un grifo en la bañera de algunos hogares. Esto produce en la médula ósea pequeños campos eléctricos, posiblemente por encima de los niveles de ruido de fondo. Sin embargo, se desconoce si representan un riesgo para la salud.

Las líneas de energía eléctrica de alto voltaje producen nubes de iones con carga eléctrica como consecuencia de la descarga de tipo corona. Se ha sugerido que podría aumentar la deposición sobre la piel y en las vías respiratorias dentro del cuerpo de los contaminantes del aire, posiblemente con efectos adversos en la salud. Sin embargo, parece probable que los iones del efecto corona tengan efectos escasos o nulos en los riesgos de salud a largo plazo, incluso en las personas más expuestas.

Ninguno de los tres mecanismos directos considerados anteriormente parece ser una causa posible del aumento de incidencia de enfermedades a los niveles de exposición que suele encontrar la población. De hecho, solamente comienzan a ser posibles a niveles varios órdenes de magnitud superiores, y los mecanismos indirectos todavía no se han investigado suficientemente. Esta ausencia de un mecanismo posible identificado no excluye la posibilidad de efectos adversos en la salud, pero hace necesaria la obtención de evidencias más sólidas a partir de la biología y la epidemiología.

#### **18.1.4 Neurocomportamiento**

La exposición a campos eléctricos en frecuencia de energía provoca respuestas biológicas bien definidas, que van desde la percepción hasta las molestias, por medio de los efectos de la carga eléctrica superficial. Estas respuestas dependen de la intensidad del campo, las condiciones ambientales y la sensibilidad individual. Los umbrales para la percepción directa por el 10% de un grupo de voluntarios fueron de 2 a 20  $\text{kV m}^{-1}$ , mientras que el 5% encontraron molestias con 15–20  $\text{kV m}^{-1}$ . Se observó que la descarga de chispas de la persona al suelo era dolorosa en el 7% de los voluntarios en un campo de 5  $\text{kV m}^{-1}$ . Los umbrales para la descarga a partir de un objeto cargado a través de una persona aterrada eléctricamente dependen del tamaño del objeto, por lo que se requiere una evaluación específica.

Los campos magnéticos rápidamente pulsantes de intensidad elevada pueden estimular el tejido nervioso periférico o central; tales efectos se pueden presentar durante los procedimientos de imagenología por resonancia magnética (IRM) y se utilizan en la estimulación magnética transcraneal. Las intensidades umbrales de un campo eléctrico inducido para la estimulación directa de los nervios podrían ser de apenas unos voltios por metro. El umbral probablemente es constante dentro de un rango de frecuencias entre unos pocos hertzios y algunos kilohertzios. Es probable que las personas que sufren epilepsia o están predispuestas a ella sean más susceptibles a los campos eléctricos de ELF inducidos en el sistema nervioso central (SNC). Además, la sensibilidad del SNC al estímulo eléctrico está probablemente asociada con un historial familiar de convulsiones y el uso de antidepresivos tricíclicos, agentes neurolépticos y otros fármacos que reducen el umbral de convulsión.

La función de la retina, que forma parte del SNC, puede verse afectada por la exposición a campos magnéticos de ELF mucho más débiles que los causantes de una estimulación directa de los nervios. La interacción del campo eléctrico inducido con las células de la retina excitables eléctricamente da lugar a una sensación de destellos luminosos, denominados fosfenos magnéticos o magnetofosfenos. Las intensidades umbral de los campos eléctricos inducidos en el fluido extracelular de la retina se ha estimado que están comprendidas entre unos 10 y 100 mV m<sup>-1</sup> a 20 Hz. Sin embargo, existe una incertidumbre considerable en la relación con estos valores.

La evidencia de otros efectos neurocomportamentales en estudios con voluntarios, tales como los efectos en la actividad eléctrica del cerebro, la cognición, el sueño, la hipersensibilidad y el humor, son menos claras. En general, dichos estudios se han realizado con niveles de exposición por debajo de los necesarios para inducir los efectos descritos anteriormente, y en el mejor de los casos solamente se han obtenido evidencias de efectos sutiles y transitorios. Las condiciones necesarias para que se den tales respuestas no están bien definidas por el momento. Hay algunos indicios que parecen indicar la existencia de efectos dependientes del campo sobre el tiempo de reacción y sobre la precisión reducida en la realización de algunas funciones cognitivas, que están respaldados por los resultados de estudios sobre la actividad eléctrica general del cerebro. En los estudios en los que se investigó si los campos magnéticos afectaban a la calidad del sueño se han reportado resultados inconsistentes. Es posible que estas inconsistencias puedan atribuirse en parte a diferencias en el diseño de los estudios.

Algunas personas afirman que son hipersensibles a los CEM en general. Sin embargo, los resultados obtenidos en estudios doble ciego de provocación parecen indicar que los síntomas notificados no guardan relación con la exposición a dichos campos.

Las únicas evidencias que la exposición a campos eléctricos y magnéticos de ELF provoca síntomas depresivos o el suicidio son inconsistentes y no concluyentes. Por lo tanto, la evidencia es considerada inadecuada.

En animales, se ha estudiado desde varias perspectivas la posibilidad de que la exposición a campos de ELF afecte a las funciones neurocomportamentales, utilizando una serie de condiciones de exposición. Son pocos los efectos sólidamente establecidos. Existe evidencia convincente que los animales pueden detectar campos eléctricos en frecuencia de energía, muy probablemente como consecuencia de los efectos de la carga superficial, que pueden provocar agitación transitoria o un estrés ligero. En las ratas, la gama de detección está comprendida entre 3 y 13 kV m<sup>-1</sup>. Se ha comprobado que los roedores muestran rechazo hacia las intensidades de campo superiores a 50 kV m<sup>-1</sup>. Otros posibles cambios dependientes del campo no están bien definidos; los estudios de laboratorio solamente han proporcionado evidencias de efectos sutiles y transitorios. Existen algunas evidencias que la exposición a campos magnéticos puede modular las funciones de los sistemas de neurotransmisores opioides y colinérgicos en el cerebro, respaldadas por los resultados de estudios en los que se investigaron los efectos en la analgesia y en la adquisición y el desempeño de funciones de memoria espacial.

#### **18.1.5 Sistema neuroendocrino**

Los resultados de varios estudios en voluntarios, así como de estudios epidemiológicos residenciales y ocupacionales, sugieren que el sistema neuroendocrino no es afectado adversamente por la exposición a campos eléctricos o magnéticos en frecuencias de energía. Esto se aplica particularmente a los niveles circulantes de hormonas específicas del sistema neuroendocrino, como la melatonina, liberada por la glándula pineal (epífisis), y a varias hormonas liberadas por glándula pituitaria (hipófisis) que intervienen en el control del metabolismo y la fisiología del cuerpo. A veces se observaron ligeras diferencias en el tiempo de la liberación de la melatonina relacionadas con ciertas características de la exposición, pero estos resultados no fueron consistentes. Es muy difícil eliminar la posible confusión debida a diversos factores ambientales y al estilo de vida que también podrían influir en los niveles hormonales. En la mayor parte de los estudios de laboratorio sobre los efectos de la exposición a campos de ELF en los niveles nocturnos de melatonina en voluntarios no se encontró ningún efecto cuando se tuvo cuidado en el control de los posibles factores de confusión.

Del gran número de estudios en animales que investigan los efectos de los campos eléctricos y magnéticos en frecuencias de energía sobre los niveles de la melatonina pineal (en la epífisis) y en el suero, algunos reportaron que la exposición provocaba la supresión nocturna de la melatonina. Los cambios en los niveles de melatonina observados por primera vez en los estudios iniciales de exposición a campos eléctricos de hasta 100 kV m<sup>-1</sup> no pudieron reproducirse. Los resultados de una serie de estudios más recientes, que mostraban que los campos magnéticos polarizados circularmente suprimían los niveles nocturnos de melatonina, fueron debilitados por las comparaciones inapropiadas entre los animales expuestos y los controles históricos. Los datos de otros experimentos en roedores, que abarcaban niveles de intensidad comprendidos desde unos pocos microteslas a 5 mT, fueron

equivocos, con algunos mostrando depresión de la melatonina, mientras que en otros no se observaron cambios. En animales de reproducción estacional, la evidencia de un efecto de la exposición a campos en frecuencia de energía sobre los niveles de la melatonina y en el estatus reproductivo dependiente de ésta son predominantemente negativas. En un estudio con primates no humanos sometidos a una exposición crónica a campos en frecuencia de energía no se detectó ningún efecto convincente en los niveles de melatonina, aunque en un estudio preliminar en el que se utilizaron dos animales se reportó la supresión de la melatonina en respuesta a una exposición irregular e intermitente.

Los efectos de la exposición a campos de ELF sobre la producción o liberación de melatonina en glándulas pineales aisladas fueron variables, aunque se han realizado relativamente pocos estudios *in vitro*. Las evidencias que la exposición a campos de ELF interfiere con la acción de la melatonina en las células de cáncer de mama *in vitro* son complicadas. Sin embargo, este sistema presenta el inconveniente que frecuentemente las líneas celulares muestran deriva genotípica y fenotípica en el cultivo que puede obstaculizar la transferibilidad posibilidad de transferencia entre laboratorios.

No se han observado efectos consistentes en las hormonas relacionadas con el estrés del eje hipófisis-glándulas suprarrenales en diversas especies de mamíferos, con la posible excepción de un estrés de corta duración tras el inicio de la exposición a campos eléctricos ELF de niveles suficientemente altos para poder percibirlos. Similarmente, si bien son pocos los estudios que se han realizado, en la mayoría se han observado efectos negativos o inconsistentes en los niveles de hormona del crecimiento y de las hormonas que intervienen en el control de la actividad metabólica o están asociadas con el control de la reproducción y el desarrollo sexual.

Considerados en conjunto, estos datos no indican que los campos eléctricos y/o magnéticos de ELF afecten al el sistema neuroendocrino de manera que se produzcan efectos adversos en la salud humana, por lo que las pruebas se consideran inadecuadas.

#### **18.1.6 Trastornos neurodegenerativos**

Se ha planteado la hipótesis que la exposición a campos de ELF puede estar asociada con varias enfermedades neurodegenerativas. En relación con la enfermedad de Parkinson y la esclerosis múltiple, el número de estudios ha sido pequeño y no hay evidencias de asociación con estas enfermedades. En el caso de la enfermedad de Alzheimer y la esclerosis lateral amiotrófica (ELA), se han publicado más estudios. Algunos de estos informes parecen indicar que las personas que trabajan en ocupaciones relacionadas con la electricidad podrían tener mayor riesgo de esclerosis lateral amiotrófica (ELA). Hasta ahora no se ha establecido ningún mecanismo biológico que pueda explicar esta asociación, aunque podría haber surgido debido a factores de confusión relacionados con las ocupaciones vinculadas a la electricidad, como los choques eléctricos. En conjunto, se considera que

las pruebas de la asociación entre la exposición a campos de ELF y la esclerosis lateral amiotrófica son (inadecuadas) insuficientes.

Los pocos estudios en los que se ha investigado la asociación entre la exposición a campos ELF y la enfermedad de Alzheimer son contradictorios. Sin embargo, los estudios de mayor calidad que se concentraron en la morbilidad de la enfermedad de Alzheimer más que en la mortalidad no indicaron una asociación. En conjunto, las pruebas de una asociación entre la exposición a campos ELF y la enfermedad de Alzheimer son insuficientes.

#### **18.1.7 Trastornos cardiovasculares**

Los estudios experimentales de exposición tanto de corta como de larga duración indican que, si bien el choque eléctrico representa un peligro evidente para la salud, es improbable que se produzcan otros efectos cardiovasculares peligrosos asociados con los campos de ELF a los niveles de exposición ambiental u ocupacional comúnmente encontrados. Aunque se han reportado diversos cambios cardiovasculares en la literatura, la mayoría de los efectos son pequeños y los resultados no han sido consistentes en los estudios y entre ellos. Con una sola excepción, ninguno de los estudios de la morbilidad y mortalidad de las enfermedades cardiovasculares ha mostrado una asociación con la exposición. La posibilidad de que exista una asociación específica entre la exposición y el control autónomo alterado del corazón sigue siendo una mera especulación. En conjunto, las pruebas no respaldan una asociación entre la exposición a campos de ELF y las enfermedades cardiovasculares.

#### **18.1.8 Inmunología y hematología**

Las evidencias de los efectos de los campos eléctricos o magnéticos de ELF sobre los componentes del sistema inmunológico en general son inconsistentes. En muchos casos las poblaciones celulares y los marcadores funcionales no fueron afectados por la exposición. Sin embargo, en algunos estudios en seres humanos con campos desde 10  $\mu$ T a 2 mT se observaron cambios en las células asesinas naturales (citólíticas), que mostraron tanto un aumento como una disminución de su número, y en la cuenta total de células blancas (leucocitos), sin cambios o con una disminución del número. En estudios en animales, se observó una actividad reducida de las células citolíticas en ratones hembras, pero no en los machos ni en las ratas de ambos sexos. También en la cuenta de células blancas el recuento de leucocitos se obtuvieron resultados inconsistentes, con una disminución o ningún cambio en los distintos estudios. La gama de exposición de los animales fue aún más amplia, de 2  $\mu$ T a 30 mT. La dificultad para interpretar el impacto potencial de estos datos en la salud radica en las grandes variaciones de las condiciones de exposición y ambientales, el número relativamente pequeño de individuos sometidos a prueba y la amplia variedad de efectos finales.

Son pocos los estudios realizados sobre los efectos de los campos magnéticos de ELF en el sistema hematológico. En los experimentos de evaluación de la cuenta diferencial de células blancas (leucocitos), las exposi-

ciones fueron desde 2  $\mu\text{T}$  a 2 mT. No se han encontrado efectos consistentes de la exposición aguda a campos magnéticos de ELF o a campos eléctricos y magnéticos de ELF combinados ni en los estudios con personas ni con animales.

Por consiguiente, de manera global las evidencias de los efectos de los campos eléctricos o magnéticos de ELF en los sistemas inmunológico y hematológico se consideran insuficientes.

#### **18.1.9 Reproducción y desarrollo**

En conjunto, los estudios epidemiológicos no han demostrado que haya una asociación entre resultados adversos en la reproducción humana con la exposición materna o paterna a campos de ELF. Hay algunas evidencias de un aumento del riesgo de aborto asociado con la exposición materna a campos magnéticos, pero son insuficientes.

Se han evaluado exposiciones a campos eléctricos de ELF de hasta 150  $\text{kV m}^{-1}$  en varias especies de mamíferos, incluidos estudios con grupos de gran tamaño y exposiciones durante varias generaciones. Los resultados, consistentemente, no mostraron ningún efecto adverso en el desarrollo.

La exposición de mamíferos a campos magnéticos de ELF de hasta 20 mT no da lugar a malformaciones externas, viscerales o esqueléticas graves. Algunos estudios muestran un aumento de pequeñas anomalías esqueléticas, tanto en ratas como en ratones. En estudios teratológicos son relativamente frecuentes las variaciones en el esqueleto, las cuales frecuentemente se consideran biológicamente insignificantes. Sin embargo, no se pueden excluir sutiles efectos de los campos magnéticos en el desarrollo del esqueleto. Se han publicado muy pocos estudios en los que se aborden los efectos en la reproducción, y de ellos no se puede extraer ninguna conclusión.

En varios estudios sobre modelos experimentales no mamíferos (embriones de pollo, peces, erizos de mar e insectos) se han reportado resultados mostrando que los campos magnéticos de ELF a niveles de microteslas pueden alterar el desarrollo inicial. Sin embargo, los resultados de los modelos experimentales no mamíferos en la evaluación global de la toxicidad en el desarrollo tienen un valor menor que los obtenidos en los estudios correspondientes con mamíferos.

En conjunto, las pruebas de efectos en el desarrollo y la reproducción son insuficientes.

#### **18.1.10 Cáncer**

La clasificación de la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) de los campos magnéticos de ELF como “posiblemente carcinogénicos para los seres humanos” (IARC, 2002) se basa en todos los datos disponibles hasta 2001 inclusive. El examen de la literatura en la presente monografía de los Criterios de Salud Ambiental se concentra principalmente en los estudios publicados después de la revisión de la IARC.

### *Epidemiología*

En la clasificación de la IARC influyeron fuertemente las asociaciones observadas en los estudios epidemiológicos sobre la leucemia infantil. La clasificación de esta evidencia como limitada no cambia con la adición de dos estudios sobre leucemia infantil publicados después de 2002. Desde la publicación de la monografía de la IARC, las evidencias de otros casos de cáncer infantil siguen siendo insuficientes.

Con posterioridad a la monografía de la IARC se han publicado varios informes relativos al riesgo de cáncer de mama en mujeres adultas asociado con la exposición a campos magnéticos de ELF. Estos estudios son más amplios que los anteriores y menos susceptibles a sesgos, y en conjunto son negativos. Con estos resultados, la evidencia de una asociación entre la exposición a campos magnéticos de ELF y el riesgo de cáncer de mama en mujeres se debilitan considerablemente y no respaldan una asociación de este tipo.

En el caso del cáncer cerebral y la leucemia en adultos, los nuevos estudios publicados después de la monografía de la IARC no modifican la conclusión de que la evidencia global de una asociación entre los campos magnéticos de ELF y el riesgo de estas enfermedades siguen siendo insuficientes.

Para otras enfermedades y todos los demás tipos de cáncer, las pruebas permanecen insuficientes.

### *Estudios en animales de laboratorio*

En la actualidad no hay ningún modelo animal adecuado para la forma más frecuente de leucemia infantil, la leucemia linfoblástica aguda. Tres estudios independientes de gran escala con ratas no proporcionaron ninguna evidencia de algún efecto de los campos magnéticos de ELF sobre la incidencia de tumores de mama espontáneos. La mayoría de los estudios no reportan ningún efecto de los campos magnéticos de ELF sobre la leucemia o los linfomas en modelos roedores. Varios estudios de gran escala de larga duración en roedores no han mostrado ningún aumento consistente de ningún tipo de cáncer, incluyendo tumores hematopoyéticos, de mama, cerebrales y de piel.

Un número sustancial de estudios examinaron los efectos de los campos magnéticos de ELF sobre tumores de mama inducidos por sustancias químicas en ratas. Se obtuvieron resultados inconsistentes, que pueden deberse totalmente o en parte a diferencias en los protocolos experimentales, tales como el uso de subrazas específicas. La mayoría de los estudios sobre los efectos de la exposición a campos magnéticos de ELF en modelos de leucemia/linfomas inducidos por sustancias químicas o por radiación fueron negativos. Los estudios de lesiones hepáticas preneoplásicas, tumores de piel inducidos por sustancias químicas y tumores cerebrales reportaron resultados predominantemente negativos. Un estudio reportó una aceleración de la tum-

origenesis cutánea inducida por radiaciones ultravioleta (UV) tras la exposición a campos magnéticos de ELF.

Dos grupos han reportado un aumento de los niveles de ruptura de las cadenas de ADN en el tejido cerebral tras la exposición in vivo a campos magnéticos de ELF. Sin embargo, otros grupos, utilizando una variedad de diferentes modelos de genotoxicidad en roedores, no encontraron ninguna evidencia de efectos genotóxicos. Los resultados de los estudios de investigación sobre los efectos no genotóxicos pertinentes al cáncer no son concluyentes.

En conjunto no hay ninguna prueba que la exposición a campos magnéticos de ELF provoque por sí sola la aparición de tumores. La evidencia que la exposición a campos magnéticos de ELF puede potenciar el desarrollo de tumores en combinación con carcinógenos es inadecuada (insuficiente).

#### *Estudios in vitro*

En general, los estudios de los efectos de la exposición de células a campos de ELF no han mostrado ninguna inducción de genotoxicidad para campos por debajo de 50 mT. La notable excepción es la evidencia obtenida en estudios recientes en los que se han descrito daños en el ADN con campos de una intensidad de apenas 35  $\mu$ T; sin embargo, estos estudios todavía están siendo evaluados y la comprensión de estos hallazgos todavía es incompleta. También existe evidencia creciente que los campos magnéticos de ELF pueden interactuar con agentes causantes de daños en el ADN.

No hay ninguna evidencia clara de la activación por campos magnéticos de ELF de genes asociados con el control del ciclo celular. Sin embargo, todavía no se han realizado estudios sistemáticos en los que se analice la respuesta del genoma completo.

Muchos otros estudios celulares, por ejemplo sobre proliferación celular, apoptosis, señalización del calcio y transformación maligna, han dado resultados inconsistentes o no concluyentes.

#### *Conclusión general*

Los nuevos estudios en seres humanos, en animales e in vitro, publicados desde la monografía de 2002 de la IARC, no modifican la clasificación global de los campos magnéticos de ELF como posibles carcinógenos para los seres humanos.

#### **18.1.11 Evaluación de los riesgos de salud**

Según la Constitución de la OMS, la salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades. La evaluación de riesgo es un marco conceptual para una revisión estructurada de la información pertinente a la estimación de los resultados para la salud o el ambiente. La evaluación de riesgo de salud se puede utilizar como un aporte a la gestión del riesgo que acompaña a todas

las actividades necesarias para adoptar decisiones sobre si una exposición requiere algunas acciones específicas y la aplicación de esas acciones.

En la evaluación de los riesgos para la salud humana, los datos válidos en seres humanos, siempre que se disponga de ellos, generalmente son más informativos que los obtenidos en animales. Los estudios en animales e in vitro pueden respaldar las pruebas procedentes de los estudios en seres humanos, llenar las brechas en la evidencia procedentes de los estudios en seres humanos o utilizarse para adoptar una decisión sobre los riesgos cuando los estudios en seres humanos son insuficientes o no existen.

Todos los estudios, ya sea con efectos positivos o negativos, necesitan ser evaluados juzgados por su propio valor, y luego en conjunto en un sistema basado en el peso de la evidencia. Es importante determinar en qué medida un conjunto de evidencias cambia la probabilidad de que la exposición dé lugar a un resultado. La evidencia de un efecto generalmente es reforzada si los resultados de distintos tipos de estudios (epidemiología y laboratorio) apuntan a la misma conclusión, o cuando estudios múltiples del mismo tipo dan el mismo resultado.

#### *Efectos agudos*

Se han establecido los efectos biológicos agudos para la exposición a campos eléctricos y magnéticos de ELF en el rango de frecuencias de hasta 100 kHz que pueden tener consecuencias adversas para la salud. Por consiguiente, se necesitan límites de exposición. Existen recomendaciones internacionales en las que se ha abordado esta cuestión. La observancia de estas recomendaciones proporciona una protección adecuada frente a los efectos agudos.

#### *Efectos crónicos*

La evidencia científica que sugiere que la exposición cotidiana crónica a campos magnéticos en frecuencia de energía de baja intensidad (por encima de 0,3–0,4  $\mu\text{T}$ ) representa un riesgo para la salud se basa en estudios epidemiológicos que demuestran que hay un patrón consistente de aumento del riesgo de leucemia infantil. Entre las incertidumbres que rodean la evaluación del peligro se incluyen el rol que podrían desempeñar en la relación observada entre los campos magnéticos y la leucemia infantil el sesgo de selección de los controles y la clasificación errónea de la exposición. Además, virtualmente ninguna de las evidencias de laboratorio y mecánicas respaldan una relación entre los campos magnéticos de ELF de bajo nivel y los cambios en la función biológica o el estado patológico. Por tanto, en el balance la evidencia no es lo suficientemente fuerte para considerar que hay una relación causal, pero sí para que se mantenga la preocupación.

Aunque no se ha establecido una relación causal entre la exposición a campos magnéticos y la leucemia infantil, se ha calculado el posible impacto en la salud pública suponiendo la existencia de causalidad, a fin de

proporcionar un aporte potencialmente útil a las políticas. Sin embargo, estos cálculos dependen en gran medida de las distribuciones de la exposición y de otras hipótesis, por lo que son muy imprecisos. Suponiendo que la asociación sea causal, se puede estimar que el número de casos de leucemia infantil en todo el mundo que podrían atribuirse a la exposición es del orden de 100 a 2400 al año. Sin embargo, esto representa 0,2 a 4,9% de la incidencia anual total de casos de leucemia, estimados en 49 000 en todo el mundo en el año 2000. Por tanto, en un contexto mundial las repercusiones en la salud pública, si las hay, serían limitadas y dudosas.

Se ha investigado la posible asociación de otras enfermedades con la exposición a campos magnéticos de ELF. Entre ellas están el cáncer tanto en niños como en adultos, la depresión, el suicidio, la disfunción reproductiva, los trastornos del desarrollo, las modificaciones inmunológicas y las enfermedades neurológicas. La evidencia científica que respalda una vinculación entre los campos magnéticos de ELF y cualquiera de estas enfermedades es mucho más débil que para la leucemia infantil, y en algunos casos (por ejemplo en las enfermedades cardiovasculares o el cáncer de mama) la evidencia es suficiente para tener la confianza que los campos magnéticos no son causa de la enfermedad.

#### **18.1.12 Medidas de protección**

Es esencial que se apliquen límites de exposición, a fin de proteger contra los efectos adversos establecidos de la exposición a campos eléctricos y magnéticos de ELF. Estos límites de exposición deberían basarse en un examen exhaustivo de toda la evidencia científica relevante.

Solamente se han establecido los efectos agudos, y hay dos recomendaciones internacionales de límites de exposición (ICNIRP, 1998a; IEEE, 2002) destinadas a la protección frente a estos efectos.

Además de estos efectos agudos conocidos, hay incertidumbres acerca de la existencia de efectos crónicos, debido a que las pruebas de una vinculación entre la exposición a campos magnéticos de ELF y la leucemia infantil son limitadas. Por consiguiente, se justifica la utilización de enfoques de precaución. Sin embargo, no se recomienda la reducción de los valores límites de las recomendaciones sobre la exposición a algún nivel arbitrario en aras de la precaución. Dicha práctica socava el fundamento científico en el que se basan los límites y probablemente sea una manera costosa y no necesariamente eficaz de proporcionar protección.

La aplicación de otros procedimientos apropiados de precaución para reducir la exposición es razonable y se justifica. Sin embargo, la energía eléctrica aporta evidentes beneficios a la salud, sociales y económicos, y los enfoques de precaución no deberían comprometer esos beneficios. Además, teniendo en cuenta, por una parte la debilidad de la evidencia de una vinculación entre la exposición a campos magnéticos de ELF y la leucemia infantil y por otra parte el limitado impacto en la salud pública si existe una vinculación, no están claros los beneficios para la salud de una reducción de la exposición. Así pues, los costos de las medidas de precaución deberían ser

muy bajos. Los costos de la aplicación de reducciones de la exposición variarán de un país a otro, por lo que resulta muy difícil formular una recomendación general para alcanzar un equilibrio entre los costos y los posibles riesgos derivados de los campos ELF.

En vista de lo expuesto, se recomienda lo siguiente.

- Los encargados de formular las políticas deberían establecer recomendaciones para la exposición a campos de ELF tanto del público en general como de los trabajadores. La mejor fuente de orientación para los niveles de exposición y los principios aplicables a la revisión científica son las recomendaciones internacionales.
- Los encargados de formular las políticas deberían establecer un programa de protección para los CEM ELF que incluya mediciones de los campos de todas las fuentes, a fin de asegurarse de que no se superen los límites de exposición del público en general o de los trabajadores.
- Siempre que no se pongan en peligro los beneficios para la salud, sociales y económicos de la energía eléctrica, es razonable y se justifica la aplicación de procedimientos de precaución de muy bajo costo para reducir la exposición.
- Los encargados de formular las políticas, los planificadores comunitarios y los fabricantes deberían aplicar medidas de muy bajo costo al construir nuevas instalaciones y diseñar nuevos equipos, incluyendo aparatos eléctricos.
- Se debe estudiar la introducción de cambios en las prácticas de ingeniería para reducir la exposición a campos de ELF procedentes de equipos o dispositivos, siempre que se obtengan otros beneficios adicionales, tales como mayor seguridad o un costo escaso o nulo.
- Cuando se planteen cambios en las fuentes existentes de campos ELF, se debería considerar los aspectos de seguridad, la fiabilidad y los aspectos económicos involucrados.
- Las autoridades locales deberían hacer cumplir las normas sobre las instalaciones eléctricas a fin de reducir corrientes a tierra accidentales cuando se construyan nuevos locales o cuando se renueven las instalaciones eléctricas ya existentes, manteniendo al mismo tiempo la seguridad. Las medidas preventivas para identificar infracciones o problemas existentes en las instalaciones eléctricas resultarían costosas y probablemente no estarían justificadas.
- Las autoridades nacionales deberían aplicar una estrategia eficaz y de comunicación abierta a fin de que todas las partes interesadas puedan adoptar decisiones fundamentadas; debe estar incluida la

información sobre la manera en que las personas pueden reducir su propia exposición.

- Las autoridades locales deben mejorar la planificación de las instalaciones emisoras de CEM ELF, incluyendo el mejoramiento de las consultas entre la industria, los gobiernos locales y los ciudadanos al establecer las principales fuentes de emisión de CEM ELF.
- Los gobiernos y la industria deberían promover programas de investigación para reducir la incertidumbre de la evidencia científica sobre los efectos de la exposición a campos ELF en la salud.

## **18.2 Recomendaciones para la investigación**

La identificación de las brechas en los conocimientos relativos a los posibles efectos en la salud de la exposición a campos de ELF es una parte esencial de la presente evaluación de los riesgos de salud. Como consecuencia, se han formulado las siguientes recomendaciones para investigación adicional (resumidas en la Tabla 1).

Es primordial la necesidad de realizar nuevas investigaciones sobre las frecuencias intermedias (FI), usualmente comprendidas entre 300 Hz y 100 kHz, dada la presente falta de datos en esta área. Es muy escasa la base de conocimientos de la cual se dispone y que se necesita para la evaluación de los riesgos de salud, y en la mayoría de los estudios existentes se han obtenido resultados inconsistentes, que es necesario comprobar ulteriormente. Los requisitos generales para establecer una base de datos de FI que sea suficiente a la hora de evaluar los riesgos de salud incluye la evaluación de la exposición, estudios epidemiológicos, estudios humanos de laboratorio y estudios en animales y celulares (*in vitro*) (ICNIRP, 2003; ICNIRP, 2004; Litvak et al., 2002).

En los estudios de laboratorio se debe conceder prioridad a las respuestas reportadas (i) para las cuales exista por lo menos alguna evidencia de replicación o confirmación, (ii) que sean potencialmente pertinentes a la carcinogénesis (por ejemplo de genotoxicidad), (iii) que sean suficientemente sólidas para permitir un análisis mecanístico y (iv) que se produzcan en sistemas de mamíferos o seres humanos.

### **18.2.1 Fuentes, mediciones y exposiciones**

La caracterización ulterior de los hogares con un exposición elevada a campos de ELF en los distintos países, a fin de identificar la contribución relativa de las fuentes internas y externas, la influencia de las prácticas de instalación del tendido eléctrico/aterramiento eléctrico y otras características del hogar, puede servir de ayuda para identificar un sistema de medición de la exposición pertinente a la evaluación epidemiológica. Un componente importante de esto es el mejor entendimiento de la exposición fetal e infantil a campos de ELF, especialmente los procedentes de la

exposición residencial a la calefacción eléctrica debajo del piso en los domicilios y de los transformadores en los edificios de viviendas.

Se sospecha que en algunos casos de exposición ocupacional se superan los límites presentes de las recomendaciones sobre campos de ELF. Se necesita más información sobre la exposición (incluso a frecuencias que no son de energía) relacionada con el trabajo, por ejemplo, mantenimiento de líneas con tensión, el trabajo dentro o cerca del núcleo central de las magnetos de los aparatos de IRM (y en consecuencia con los campos de ELF de gradiente conmutada) y el trabajo en sistemas de transporte. Asimismo, se necesitan más conocimientos acerca de la exposición del público general que pueda acercarse a los límites de las recomendaciones, incluyendo fuentes tales como los sistemas de seguridad, los sistemas de desmagnetización de las bibliotecas, las cocinas de inducción y los calentadores de agua.

Se ha propuesto la exposición a corrientes de contacto como una posible explicación de la asociación de los campos magnéticos de ELF con la leucemia infantil. Es necesario realizar investigaciones en países distintos de los Estados Unidos para evaluar la posibilidad de que las prácticas de aterramiento eléctrico residenciales y la ductería de agua potable en las viviendas den lugar a corrientes de contacto. Dichos estudios tendrían prioridad en los países con resultados epidemiológicos importantes con respecto a los campos de ELF y la leucemia infantil.

#### **18.2.2 Dosimetría**

La mayor parte de las investigaciones de laboratorio realizadas en el pasado se basaban en corrientes eléctricas inducidas en el cuerpo como métrica básica, de manera que la dosimetría se concentraba en esta cantidad. Sólo en fechas recientes se ha comenzado a explorar la relación entre la exposición externa y los campos eléctricos inducidos. Para comprender mejor los efectos biológicos, se necesitan más datos sobre los campos eléctricos internos en distintas condiciones de exposición.

Se debe realizar un cálculo de los campos eléctricos internos, debido a la influencia combinada de los campos eléctricos y magnéticos externos en distintas configuraciones. Es necesaria la adición vectorial de las contribuciones fuera de fase y con variaciones espaciales de los campos eléctricos y magnéticos para evaluar el cumplimiento de las restricciones básicas.

Son muy pocos los cálculos que se han realizado sobre modelos avanzados de la mujer embarazada y el feto con modelos anatómicos apropiados. Es importante evaluar el posible aumento de la inducción de campos eléctricos en el feto en relación con el tema de la leucemia infantil. En este sentido son importantes la exposición ocupacional materna y residencial.

Existe la necesidad de seguir perfeccionando los modelos microdosimétricos, con el objetivo de tener en cuenta la estructura celular de las redes neurales y otros sistemas suborgánicos complejos identificados como más sensibles a los efectos de los campos eléctricos inducidos. En este proceso de modelamiento también se debe tener presente la influencia en los

potenciales eléctricos de la membrana celular y en la liberación de neurotransmisores.

### **18.2.3 Mecanismos biofísicos**

Existen tres áreas principales en las que son evidentes los límites del entendimiento actual de los mecanismos: el mecanismo par radical, las partículas magnéticas en el cuerpo y la relación señal a ruido en los sistemas multicelulares, tales como las redes neuronales.

El mecanismo par radical es uno de los mecanismos más verosímiles de interacción de bajo nivel, pero todavía no se ha demostrado que es capaz de mediar efectos significativos en el metabolismo y la función celular. Es particularmente importante entender el límite inferior de exposición al cual actúa, de manera que se pueda determinar si puede ser o no un mecanismo importante para la carcinogénesis. Teniendo en cuenta los estudios recientes en los que aumentaron las especies de oxígeno reactivo en células inmunitarias expuestas a campos de ELF, se recomienda el empleo de células del sistema inmunológico que generan especies de oxígeno reactivo como parte de su respuesta inmunitaria como modelos celulares para investigar el potencial del mecanismo par radical.

Aunque, de acuerdo con las evidencias actuales, la presencia de partículas magnéticas (cristales de magnetita) en el cerebro humano no parece conferir sensibilidad a los campos magnéticos de ELF del ambiente, se deberían explorar más enfoques teóricos y experimentales para estudiar si tal sensibilidad puede existir bajo determinadas condiciones. Además, se debería buscar cualquier modificación que pueda introducir la presencia de magnetita en el mecanismo par radical antes mencionado.

Se debe seguir investigando en qué medida actúan mecanismos multicelulares en el cerebro, de manera que mejoren las relaciones señal a ruido, a fin de desarrollar un marco teórico para su cuantificación o para determinar sus posibles límites. Se debe realizar investigación adicional del umbral y la respuesta de frecuencia de las redes neuronales en el hipocampo y en otras partes del cerebro utilizando métodos *in vitro*.

### **18.2.4 Neurocomportamiento**

Se recomienda que los estudios de laboratorio basados en voluntarios sobre los posibles efectos en el sueño y en la realización de tareas que exijan un esfuerzo mental grande se lleven a cabo utilizando procedimientos metodológicos armonizados. Es necesario identificar las relaciones dosis-respuesta con densidades de flujo magnético superiores a las utilizadas anteriormente y con una gama amplia de frecuencias (es decir, en el rango de los kilohertz).

Los estudios realizados en voluntarios adultos y en animales sugieren que pueden producirse efectos cognitivos agudos con exposiciones de corto plazo a campos eléctricos o magnéticos intensos. La caracterización de tales efectos es muy importante para el desarrollo de orientación sobre la exposición, pero se carece de datos específicos concernientes a efectos

dependientes del campo en niños. Se recomienda la realización de estudios de laboratorio en la cognición y los cambios en los electroencefalogramas (EEG) en personas expuestas a campos de ELF, incluyendo adultos sujetos habitualmente a exposición ocupacional y niños.

Los estudios de comportamiento con animales inmaduros proporcionan un indicador útil de los posibles efectos cognitivos en los niños. Se deben estudiar los posibles efectos de la exposición prenatal y postnatal a campos magnéticos de ELF en el desarrollo del sistema nervioso y la función cognitiva. Sería útil complementar estos estudios con investigaciones sobre los efectos de la exposición a campos magnéticos de ELF y campos eléctricos inducidos en el crecimiento de las células nerviosas, utilizando rebanadas de cerebro o neuronas cultivadas.

Es necesario seguir investigando las consecuencias potenciales en la salud sugeridas por los datos experimentales que muestran respuestas opioides y colinérgicas en animales. Se deberían ampliar los estudios en los que se examina la modulación de las respuestas opioides y colinérgicas en animales y se debería definir los parámetros de exposición y la base biológica de estas respuestas de comportamiento.

#### **18.2.5 Sistema neuroendocrino**

La base de datos existente sobre la respuesta neuroendocrina no indica que la exposición a campos de ELF tenga impactos adversos en la salud humana. Por consiguiente, no se formula ninguna recomendación para nuevas investigaciones.

#### **18.2.6 Trastornos neurodegenerativos**

En varios estudios se ha observado un aumento del riesgo de esclerosis lateral amiotrófica en las “ocupaciones eléctricas”. Se considera importante realizar más investigación de esta asociación, a fin de descubrir si los campos magnéticos de ELF intervienen como causa de esta rara enfermedad neurodegenerativa. Esta investigación requiere estudios prospectivos de cohortes de gran envergadura con información sobre la exposición a campos magnéticos de ELF, a choques eléctricos así como exposición a otros posibles factores de riesgo.

Sigue siendo discutible si los campos magnéticos de ELF constituyen un factor de riesgo para la enfermedad de Alzheimer. Los datos disponibles en la actualidad no son suficientes, por lo que habría que estudiar más esta asociación. Tiene particular importancia el uso de datos sobre la morbilidad más que sobre la mortalidad.

#### **18.2.7 Trastornos cardiovasculares**

No se considera prioritaria la realización de investigaciones adicionales sobre la asociación entre los campos magnéticos de ELF y el riesgo de enfermedades cardiovasculares.

### **18.2.8 Inmunología y hematología**

Los cambios observados en los parámetros inmunológicos y hematológicos en adultos expuestos a campos magnéticos de ELF mostraron inconsistencias, y esencialmente no se dispone de datos de investigación sobre niños. Por consiguiente, se recomienda la realización de estudios sobre los efectos de la exposición a campos de ELF en el desarrollo de los sistemas inmunológicos y hematopoyético en animales jóvenes.

### **18.2.9 Reproducción y desarrollo**

Existen algunas evidencias de un aumento del riesgo de aborto asociado con la exposición a campos magnéticos de ELF. Teniendo en cuenta las repercusiones potencialmente elevadas de dicha asociación para la salud pública se recomienda la realización de nuevas investigaciones epidemiológicas.

### **18.2.10 Cáncer**

La máxima prioridad de las investigaciones en esta área corresponde a la solución del conflicto entre los datos epidemiológicos (que muestran una asociación entre la exposición a campos magnéticos de ELF y un aumento del riesgo de leucemia infantil) y los datos experimentales y mecanísticos (que no respaldan esta asociación). Se recomienda la colaboración de epidemiólogos y científicos experimentales en este sentido. Para que los nuevos estudios epidemiológicos sean ilustrativos, se deben concentrar en nuevos aspectos de la exposición, en la interacción potencial con otros factores o en grupos muy expuestos, o bien introducir alguna otra innovación en esta esfera de investigación. Además, se recomienda también la actualización de los análisis combinados existentes, añadiendo datos de estudios recientes y aplicando nuevos conocimientos dentro del análisis.

En los estudios sobre el cáncer cerebral infantil se han obtenido resultados inconsistentes. Al igual con la leucemia infantil, el análisis de los estudios combinados sobre el cáncer cerebral infantil sería muy informativo, por lo que se recomienda. Un análisis de este tipo puede proporcionar sin grandes gastos mayor y mejor información sobre los datos existentes, incluyendo la posibilidad del sesgo de selección, y si los estudios son suficientemente homogéneos puede ofrecer la mejor estimación de riesgo.

En el caso del cáncer de mama en adultos, estudios más recientes han mostrado de manera convincente que no existe ninguna asociación con la exposición a campos magnéticos de ELF. Por consiguiente, la investigación adicional sobre esta asociación debe ser objeto de una prioridad muy baja.

En relación con la leucemia y el cáncer cerebral en adultos, se recomienda la actualización de las cohortes de gran envergadura existentes de personas expuestas ocupacionalmente. Los estudios ocupacionales, los análisis combinados y los metaanálisis para la leucemia y el cáncer cerebral han sido inconsistentes y no concluyentes. Sin embargo, posteriormente se han publicado nuevos datos que deberían utilizarse para actualizar estos análisis.

Se ha de conceder prioridad al abordar las evidencias epidemiológicas, mediante el establecimiento de modelos in vitro y animales apropiados para las respuestas a campos magnéticos de ELF de bajo nivel que sean ampliamente transferibles entre laboratorios.

Se deben desarrollar modelos de roedores transgénicos para la leucemia infantil, a fin de disponer de modelos de animales experimentales apropiados para estudiar los efectos de la exposición a campos magnéticos de ELF. De otra manera, para los estudios existentes en animales el peso de la evidencia es que no existen efectos carcinogénicos provenientes de los campos magnéticos de ELF actuando por sí solos. Por consiguiente, se debe conceder máxima prioridad a los estudios in vitro y en animales en los que se evalúen rigurosamente los campos magnéticos de ELF como cocarcinógenos.

Con respecto a otros estudios in vitro, se deben repetir los experimentos en los que se reportan los efectos genotóxicos de una exposición intermitente a campos magnéticos de ELF.

#### **18.2.11 Medidas de protección**

Se recomienda la realización de investigaciones sobre la formulación de políticas de protección de la salud y su aplicación en sectores con incertidumbre científica, en concreto sobre el uso del principio de precaución, su interpretación y la evaluación del impacto de las medidas de precaución para campos magnéticos de ELF y otros agentes clasificados como “posibles carcinógenos para los seres humanos”. Cuando existen incertidumbres acerca del riesgo potencial para la salud que un agente plantea para la sociedad, medidas de precaución que pueden estar justificadas, a fin de asegurar la protección adecuada del público y los trabajadores. Son limitadas las investigaciones que se han realizado sobre este tema para campos magnéticos de ELF y, debido a su importancia, es necesario seguir investigando. Esto puede ayudar a los países a integrar el principio de precaución en sus políticas de protección de la salud.

Se aconsejan nuevas investigaciones sobre la percepción y comunicación del riesgo orientadas específicamente a los campos electromagnéticos. Se han investigado ampliamente los factores psicológicos y sociológicos que influyen en la percepción del riesgo en general. Sin embargo, han sido limitadas las investigaciones para analizar la importancia relativa de estos factores en el caso de los campos electromagnéticos o para identificar otros factores específicos de dichos campos. En estudios recientes se ha sugerido que las medidas de precaución que transmiten mensajes de riesgo implícitos pueden modificar la percepción del riesgo, aumentando o disminuyendo la preocupación. Por consiguiente, está justificada una investigación más profunda sobre este tema.

Se debe realizar la investigación sobre el desarrollo de un análisis de costo-beneficio / costo-efectividad para la mitigación de los campos magnéticos de ELF. El empleo del análisis de costo-beneficio y costo-efectividad para evaluar si una opción en materia de políticas es beneficiosa para la

sociedad se ha investigado en muchos sectores de las políticas públicas. Es necesario formular un marco que permita identificar qué parámetros son necesarios a fin de realizar este análisis para campos magnéticos de ELF. Debido a las incertidumbres en la evaluación, se necesitará incorporar parámetros cuantificables y no cuantificables.

**Tabla 1. Recomendaciones para nuevas investigaciones**

<b>Fuentes, mediciones y exposiciones</b>	<b>Prioridad</b>
Caracterización ulterior de los hogares con exposición elevada a campos magnéticos de ELF en distintos países	Media
Identificar las brechas en el conocimiento acerca de la exposición ocupacional a campos de ELF, tales como en las IRM	Alta
Evaluación de la capacidad de las instalaciones eléctricas residenciales fuera de los Estados Unidos para inducir corrientes de contacto en los niños	Media
<b>Dosimetría</b>	
Dosimetría computacional adicional de la relación de los campos eléctricos y magnéticos externos con los campos eléctricos internos, en particular con respecto a la exposición a campos eléctricos y magnéticos combinados en distintas orientaciones	Media
Cálculo de los campos eléctricos y las corrientes inducidos en las mujeres embarazadas y en el feto	Media
Mayor perfeccionamiento de los modelos microdosimétricos, teniendo en cuenta la estructura celular de las redes neurales y otros sistemas suborgánicos complejos	Media
<b>Mecanismos biofísicos</b>	
Mayor estudio de los mecanismos par radical en las células inmunitarias que generan especies de oxígeno reactivo como parte de su función fenotípica	Media
Nuevos estudios teóricos y experimentales de la posible función de la magnetita en la sensibilidad a campos magnéticos de ELF	Baja
Determinación de las respuestas umbral a campos eléctricos internos inducidos por campos de ELF en sistemas multicelulares, tales como las redes neurales, utilizando enfoques teóricos e in vitro	Alta
<b>Neurocomportamiento</b>	
Estudios de la función cognitiva, el sueño y el electroencefalograma (EEG) en voluntarios, con inclusión de niños y personas ocupacionalmente expuestas, utilizando un amplio rango de frecuencias de campos de ELF con densidades de flujo elevadas	Media
Estudios de la exposición prenatal y postnatal en la función cognitiva posterior en animales	Media
Nuevos estudios de las respuestas opioides y colinérgicas en animales	Baja

<b>Trastornos neurodegenerativos</b>	
Estudios adicionales del riesgo de esclerosis lateral amiotrófica en ocupaciones eléctricas y en relación con la exposición a campos magnéticos de ELF y de la enfermedad de Alzheimer en relación con la exposición a dichos campos	Alta
<b>Inmunología y hematología</b>	
Estudios de las consecuencias de la exposición a campos magnéticos de ELF sobre el desarrollo del sistema inmunitario y hematopoyético en animales jóvenes	Baja
<b>Reproducción y desarrollo</b>	
Further study of the possible link between miscarriage and ELF magnetic field exposure Estudio adicional de la posible vinculación entre el aborto y la exposición a campos magnéticos de ELF	Baja
<b>Cáncer</b>	
Actualización de los análisis combinados existentes de la leucemia infantil con nueva información	Alta
Análisis combinados de los estudios existentes sobre los tumores cerebrales infantiles	Alta
Update existing meta-analyses of adult leukaemia and brain tumour studies and of cohorts of occupationally exposed individuals Actualización de los meta análisis existentes de los estudios sobre la leucemia y los tumores cerebrales en adultos y de las cohortes de personas expuestas ocupacionalmente	Media
Desarrollo de modelos de leucemia infantil en roedores transgénicos para su utilización en estudios sobre los campos de ELF	Alta
Evaluación de los efectos cocarcinogénicos utilizando estudios <i>in vitro</i> y en animales	Alta
Intento de reproducción de estudios de genotoxicidad <i>in vitro</i>	Media
<b>Medidas de protección / precautorias / prevención</b>	
Investigación sobre la formulación de políticas de protección de la salud y su aplicación en sectores con incertidumbre científica	Media
Nuevas investigaciones sobre la percepción y la comunicación del riesgo orientadas a los campos electromagnéticos	Media
Desarrollo de un análisis costo-beneficio/costo efectividad para la mitigación de los campos de ELF	Media