

EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS AMBIENTALES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL. LÍMITES DE SEGURIDAD Y EVIDENCIA CIENTÍFICA RECIENTE

Alejandro Úbeda
 BEMLab, Servicio de
 BioElectroMagnética-
 Investigación
 Hospital Ramón y Cajal, Madrid

1- INTRODUCCIÓN

La generalización del uso de la energía eléctrica y del empleo de radiofrecuencias para la transmisión de la información a distancia han dado lugar a una presencia virtualmente ubicua de campos o radiaciones electromagnéticas no ionizantes (RNI) en el medio ambiente urbano. Estas radiaciones consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilatorios (Fig. 1) capaces de interactuar de formas diferentes con los sistemas biológicos, incluidos los seres humanos. Básicamente, la forma en que las ondas electromagnéticas afectan a los sistemas biológicos viene determinada por su frecuencia y su intensidad.

Según su interacción con los biosistemas, las radiaciones electromagnéticas se han clasificado en "ionizantes" y "no ionizantes". Las ionizantes corresponden a señales electromagnéticas de frecuencias extremadamente altas, como los rayos X y los rayos gamma, que transmiten a los sistemas biológicos energía suficiente como para romper enlaces atómicos y dividir moléculas en iones, positivos y negativos. A este fenómeno se le conoce como "ionización." La denominación de radiaciones no ionizantes (RNI) se aplica a la porción del espectro electromagnético que posee energías de fotón demasiado débiles para romper las uniones atómicas. Incluso las RNI de

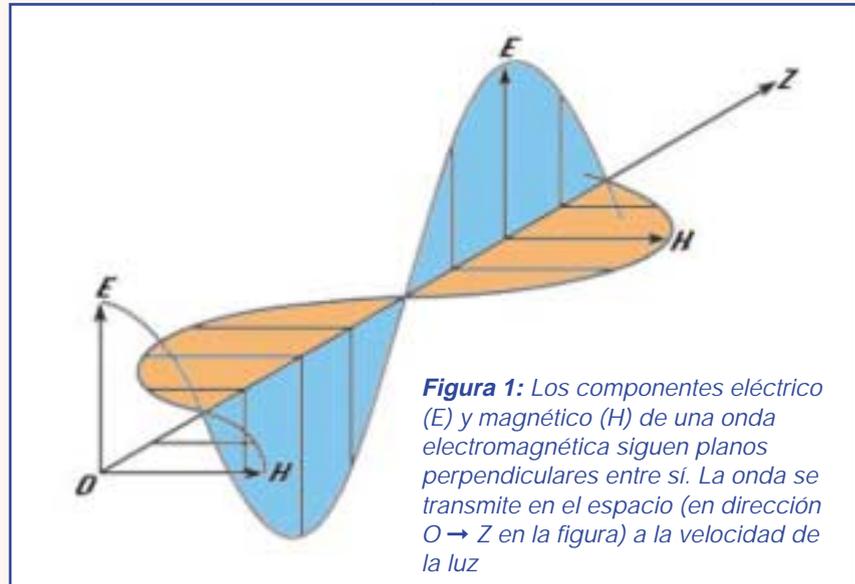


Figura 1: Los componentes eléctrico (E) y magnético (H) de una onda electromagnética siguen planos perpendiculares entre sí. La onda se transmite en el espacio (en dirección $O \rightarrow Z$ en la figura) a la velocidad de la luz

alta intensidad son incapaces de provocar ionización en sistemas biológicos. En el espectro no ionizante se incluyen: la radiación ultravioleta A (UVA), la luz visible, la radiación infrarroja, las microondas (MW) y radiofrecuencias (RF), los campos de frecuencias bajas (LF), y los campos eléctricos y magnéticos estáticos. La Figura 2 ilustra de forma simplificada los distintos rangos del espectro no ionizante y los efectos biológicos que pueden derivarse de la exposición aguda (corta y esporádica) a señales intensas de esas frecuencias.

Las posibles consecuencias sobre la salud humana de la exposición a dichos campos electromagnéticos (CEM) son objeto de interés creciente por parte del público y de autoridades responsables de salud ambiental. En respuesta a dicho interés, el Comité Internacional para la Protección ante Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP en inglés), un Grupo de expertos comisionado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), elaboró

en 1998 una guía de niveles de referencia y restricciones básicas cuyo cumplimiento garantizase la seguridad de los ciudadanos en lo referente a radioprotección ante efectos nocivos de exposiciones agudas a campos no ionizantes. Un año después, el Consejo de la Unión Europea (CUE) hizo suyos los criterios y conclusiones de ICNIRP y elaboró una Recomendación para la protección del público en general (no aplicable a los trabajadores) ante eventuales efectos nocivos de la exposición a RNI en el espectro 0 Hz – 300 GHz. España, al igual que la mayor parte de los países europeos, firmó la Recomendación en julio de 1999, asumiendo el compromiso de desarrollar en un plazo breve estrategias que garantizaran la aplicación de la Recomendación del CUE en territorio español. Este compromiso se ha cumplido en parte mediante la colaboración de los Ministerios de Sanidad y Consumo (MSC) y de Ciencia y Tecnología (MCT). En efecto, a finales de 1999, el MSC co-

¹ Este artículo ha sido elaborado siguiendo el enfoque y usando la información incluida en la conferencia "Campos magnéticos de frecuencia industrial y salud pública: Avances recientes en el establecimiento de límites de seguridad", impartida por el autor el 11 de marzo de 2003 en el Colegio y Asociación de Ingenieros Industriales de Vizcaya.

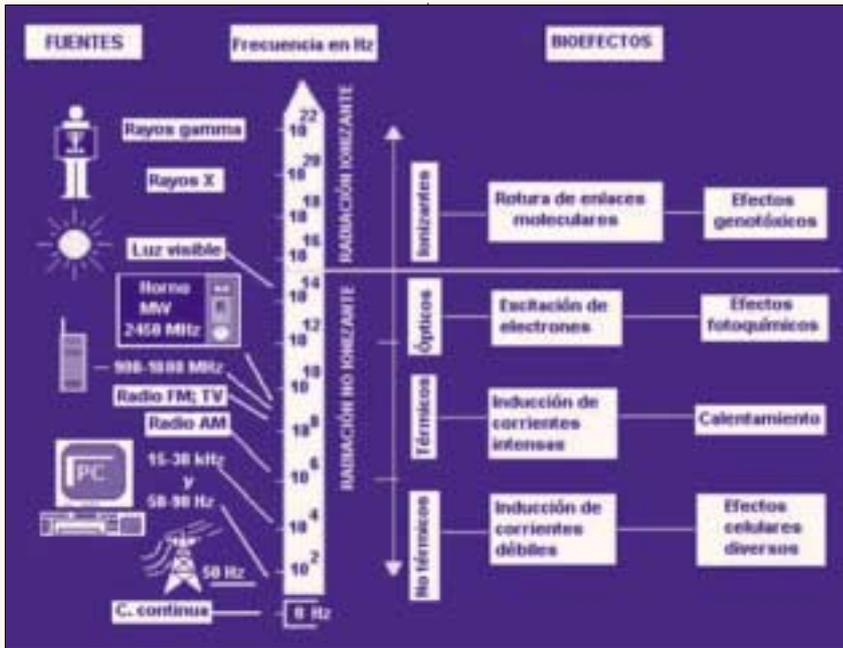


Figura 2. Las radiaciones electromagnéticas y sus efectos biológicos en función de la frecuencia de las ondas

misionó a un grupo de nueve expertos independientes para revisar y evaluar los datos de la bibliografía más reciente sobre bioefectos de las RNI. De esa revisión debería derivarse un conjunto de conclusiones sobre la potencial nocividad de la exposición a RNI en ambientes públicos y residenciales, y un paquete de recomendaciones para la protección de los ciudadanos ante tales efectos. Este Comité de Expertos Independientes (CEI) concluyó su labor y publicó sus conclusiones en mayo de 2001. A partir de las conclusiones del CEI, y recogiendo las recomendaciones del mismo, los ministerios citados elaboraron un proyecto de Real Decreto de radioprotección ante RNI en el rango de las radiofrecuencias (RF) de telecomunicación. Desde su aprobación por las Cortes, en septiembre de 2001, el Real Decreto 1066/2001 obliga en España a que las exposiciones del público a señales de telecomunicación no excedan en ningún caso los niveles de seguridad recomendados por ICNIRP y CUE. Aun-

que el Real Decreto no regula la exposición del público a señales de frecuencias bajas (FB), como son las de 50 Hz, propias de los sistemas de transporte eléctrico (líneas de baja o alta tensión), el texto de la ley respalda implícitamente los niveles ICNIRP y europeos recomendados para exposiciones a esas frecuencias.

Resumiremos sucintamente la base teórica-experimental que respalda las medidas de radioprotección propuestas por la OMS y por el CUE, y haremos una revisión de la literatura científica reciente sobre los bioefectos de los campos electromagnéticos de frecuencia industrial (FI: 50-60

Hz). Describiremos cómo la interpretación que algunos expertos hacen de la literatura científica ha generado un cierto grado de controversia en el seno de la comunidad científica y ha dado lugar a que países europeos, como Italia, se muestren disconformes con determinados aspectos de la Recomendación CUE. Este artículo identifica también la existencia de algunas carencias en el presente conocimiento científico sobre la materia. Tales carencias son en gran medida responsables de la controversia y la percepción de riesgo existentes, por lo que es urgente incrementar y mejorar la investigación dirigida a completar el conocimiento científico sobre la respuesta biológica a las radiaciones no ionizantes.

2- Valoración de la evidencia científica como estrategia esencial en la evaluación y gestión de riesgos ligados a la exposición a RNI

La correcta gestión y control de eventuales riesgos derivados de la exposición de la población a un agente físico ambiental como los campos FI, necesita una evaluación previa de esos riesgos tan extensa y completa

Figura 3: La evaluación de la información científica permite la caracterización y clasificación del agente, como base para el establecimiento de estrategias de control los riesgos derivados de la exposición



como sea posible. Tal como se ilustra en la Figura 3, esta evaluación del riesgo se hace bajo tres puntos de vista: 1) Identificación de los peligros derivados de la exposición, 2) Identificación de la relación dosis-respuesta o señal-respuesta. 3) Estimación cuantitativa y cualitativa del tipo, duración y distribución de la exposición en la población. La correcta interpretación de la información obtenida en las tres etapas citadas permite caracterizar y clasificar el riesgo de forma adecuada.

Así, la evidencia científica constituye la base de la evaluación y caracterización del riesgo. A tal propósito, dicha evidencia 1) debe ser extensa, fiable y relevante para la determinación de riesgos en humanos, y 2) debe ser interpretada de forma correcta, completa y dirigida a la protección de la salud pública. La evidencia científica que permite determinar si la exposición a campos FI supone un riesgo para la salud proviene de varias fuentes: Cálculos sobre modelos digitalizados, estudios de laboratorio, ya sean sobre cultivos de células o tejidos (estudios *in vitro*) o sobre animales completos (estudios *in vivo*), estudios clínicos y estudios epidemiológicos. A la hora de evaluar potenciales riesgos, los expertos deben tomar en consideración, valorar e integrar resultados de estudios en diversas disciplinas, teniendo en cuenta que ningún estudio o tipo de estudios resulta definitivo por sí solo. Además, en el caso de las RNI, la obtención de evidencia experimental y epidemiológica tiene una serie de peculiaridades y limitaciones que hacen especialmente compleja la labor evaluación.

Limitaciones en estudios experimentales

Cuando se trata de campos FI, no es posible reproducir en laboratorio ni la compleja naturaleza de los procesos bioeléctricos que se dan en el organismo humano ni el ambiente electromagnético de distintos entornos. Por ello, un problema específico en el estudio de los bioefectos de los citados campos estriba en la correcta determinación de las características de la exposición para las muestras (células o animales) tratadas y sus

La identificación de una respuesta biológica no implica directamente la existencia de un efecto perjudicial para la salud

controles no expuestos. Hasta hace pocos años, la determinación precisa de los niveles de campos ambientales en laboratorio era difícil debido a que sólo recientemente se ha desarrollado instrumental con la suficiente precisión y sensibilidad. Por ese motivo, muchos estudios realizados hasta ahora no han tenido en cuenta la presencia de campos propios del ambiente del laboratorio, que afectaban a los grupos expuestos y/o a sus controles, y que podrían haber influido significativamente en los resultados obtenidos. La metodología de esos estudios presenta, por lo tanto, limitaciones potencialmente importantes y sus resultados pueden ser cuestionables.

Limitaciones en epidemiología

El estudio de poblaciones que se han visto expuestas crónicamente a campos FI constituye una herramienta valiosa en la identificación de posibles riesgos. Sin embargo, la epidemiología de los efectos de los campos en estas poblaciones resulta complicada por:

- 1) Las dificultades inherentes a la valoración de la exposición y de los restantes factores que pudieran incidir en el riesgo de padecer la enfermedad.
- 2) La baja fuerza de asociación (si es que la hubiera) entre exposición y los distintos tipos de enfermedades investigadas.
- 3) Los factores de confusión: El hecho de que una enfermedad aparezca como correlacionada con la presencia de campos FI en el ambiente, no implica necesariamente que la exposición sea la causa real de la enfermedad. Es posible que en ese ambiente los campos se den simultáneamente con otro agente que sea el ver-

dadero factor causal de la enfermedad.

Por lo tanto, una consideración importante en la epidemiología de los campos FI es la forma en que se obtiene la información. En unos casos la exposición de los sujetos se estima a partir del código de cableado de las viviendas o de las líneas de alta tensión próximas, mientras que, en otros casos, se llevan a cabo mediciones reales. En estos últimos casos es importante saber con qué frecuencia se realizaron las mediciones o en qué puntos de un mismo ambiente se realizaron las mediciones (distancia a la fuente de los campos). Incluso en los casos en que se hayan realizado mediciones completas, tales mediciones, tomadas en el momento del estudio, pueden constituir sólo una indicación imprecisa de las exposiciones recibidas años atrás, cuando se inició el proceso de la enfermedad diagnosticada posteriormente. Las carencias en la precisión de los datos sobre exposición dificultan la interpretación de los resultados de un estudio.

Una forma apropiada de abordar la incertidumbre en el estudio de riesgos es la ejecución de los denominados *pooled-analysis*. Este tipo de análisis toma los resultados de varios estudios previos, investigar las diferencias entre ellos y, si resulta apropiado, combina los resultados para calcular el riesgo total estimado. El principal problema de los *pooled-analysis* realizados hasta ahora estriba en el hecho de que las técnicas de medición y evaluación de la exposición difieren en los distintos estudios originales. Esas diferencias dificultan la combinación de los resultados en una forma coherente.

3- Estándares de exposición ICNIRP y CUE: Criterios de valoración de la evidencia científica y de evaluación de riesgos

Criterios de plausibilidad y relevancia de la evidencia

El grupo de expertos de ICNIRP llevó a cabo un estudio exhaustivo de la literatura científica y realizó una "evaluación de la credibilidad de los datos publicados". En esta evaluación sólo se tuvieron en cuenta los efectos que los citados expertos calificaron como "bien establecidos". Concretamente, la potencial inducción de enfermedades (determinados tipos de cáncer, principalmente) por exposición crónica a campos FI no fue considerada bien establecida y, por tanto, los límites ICNIRP están basados en efectos inmediatos sobre la salud. A las frecuencias bajas que nos ocupan, dichos efectos comprenderían: la estimulación de nervios periféricos y músculos, *shocks* y quemaduras provocados por contactos con objetos conductores. En el caso de los potenciales efectos de exposiciones a largo plazo, tales como los citados incrementos en el riesgo de cáncer, ICNIRP entiende que los datos disponibles son insuficientes para proporcionar una base para el establecimiento de restricciones a la exposición. Ello, a pesar de que "la investigación epidemiológica ha proporcionado indicaciones, aunque no convincentes" de una asociación entre posibles efectos cancerígenos y exposiciones a campos de 50/60 Hz con densidades de flujo magnético sustancialmente más bajas que las recomendadas por ICNIRP.

La literatura sobre los efectos *in vitro* de los campos fue también evaluada por ICNIRP. De acuerdo con esta Comisión, existen numerosos datos de respuestas tisulares y celulares ante exposiciones cortas a campos de bajas frecuencias. Sin embargo, en estos casos, el tipo de relación dosis-respuesta no resulta evidente. ICNIRP considera que los resultados de los estudios *in vitro* son de interés limitado a la hora de valorar posibles efectos de los CEM sobre la salud, dado que muchas de las respuestas

in vitro no han sido comprobadas sobre organismos completos (*in vivo*). En consecuencia, los estudios *in vitro* por sí solos no fueron considerados una base suficiente para valorar posibles efectos de los CEM sobre la salud.

Criterios de nocividad: Efectos biológicos y efectos nocivos

En la valoración de los posibles efectos de las RNI es necesario tener en cuenta que la identificación de una respuesta biológica no implica directamente la existencia de un efecto perjudicial para la salud. Así, los sistemas biológicos responden a estímulos externos diversos siguiendo patrones fisiológicos que permiten al sistema relacionarse con su medio. Estas respuestas normales son ejemplos de efectos biológicos, como ocurre en el caso del ojo que, bajo exposición a una RNI intensa en el espectro visible, presenta una respuesta fisiológica y reversible en forma de contracción de la pupila.

En consecuencia, la categorización de un agente físico o químico en términos de nocividad o inocuidad se determina en función de las características de la respuesta. Entre dichas características, la OMS incluye: la reversibilidad o irreversibilidad del efecto cuando el agente es retirado, la existencia o no de mecanismos fisiológicos capaces de compensar eficazmente el efecto, y el nivel de probabilidad de que la respuesta conduzca a efectos nocivos para el bienestar físico, mental o social del sujeto.

Factores de seguridad para el público

A partir de su revisión de la evidencia científica, el Comité de ICNIRP llegó a establecer, para los distintos rangos de frecuencia del espectro no ionizante, los niveles mínimos o umbrales de exposición por encima de los cuales cabría esperar efectos adversos para la salud. Una vez determinados estos valores, se concluyó que niveles 50 veces más bajos (2%) que los citados umbrales eran capaces de garantizar un grado suficiente de seguridad en caso de exposiciones del público general. Estos valores fueron los establecidos por ICNIRP y

CUE como Restricciones Básicas (Tabla 1) recomendadas para las exposiciones a las respectivas frecuencias.

Tabla 1: Restricciones básicas y niveles de referencia para el público general

Restricciones básicas: Valor que no debe rebasarse en las exposiciones. Basado directamente en la evidencia sobre efectos nocivos. Para cada frecuencia, representa el 2% del umbral de potencial nocividad. Se han establecido teniendo en cuenta las variaciones que puedan introducir las sensibilidades individuales y las condiciones medioambientales así como las diferencias de edad y estado de salud entre los ciudadanos.

Niveles de referencia: La medición directa en las unidades en que vienen dadas la Restricciones básicas no es siempre posible. En ese caso, la exposición ha de ser valorada mediante cálculos basados en los Niveles de Referencia, los cuales vienen dados en unidades susceptibles de medición directa. Están calculados a partir de las restricciones básicas presuponiendo un acoplamiento máximo del campo con los tejidos del individuo expuesto, a fin de obtener un máximo de protección. Así, el cumplimiento de los Niveles de Referencia garantiza el cumplimiento de las Restricciones Básicas correspondientes.

Criterios biofísicos aplicados en el establecimiento de los límites de exposición.

Los campos electromagnéticos son capaces de inducir corrientes en un cuerpo conductor expuesto. Las características de estas corrientes dependen 1) de factores biológicos, tales como las características eléctricas de los tejidos expuestos y la forma y tamaño del cuerpo sometido al campo, y 2) de parámetros físicos del campo, tales como la frecuencia, la intensidad y la forma de la señal. El principio de las normativas de protección ICNIRP y CUE persiguen limitar el nivel de corriente que pueda inducirse en los tejidos de un sujeto como consecuencia de su exposición a una RNI determinada.

Así, el cuerpo humano es conductor eléctrico para campos estáticos y

de baja frecuencia, tales como los campos FI, de 50 Hz en Europa. El paso de corrientes eléctricas intensas puede provocar alteraciones severas en el funcionamiento de tejidos electrosensibles, como el tejido nervioso y el muscular (incluyendo el músculo cardíaco). A partir de su revisión de la evidencia científica ICNIRP y CUE determinan que, para exposiciones a campos de 50 Hz, el nivel umbral para efectos potencialmente nocivos en humanos estaría en una densidad de 100 mA/m². Sobre este dato, y aplicando el factor de protección establecido para público en general (2%), la Recomendación Europea del CUE aconseja que el público no reciba exposiciones a CEM de 50 Hz con niveles superiores a 2 mA/m² (Restricción básica para campos de 50 Hz). A través de los cálculos apropiados se deduce que el cumplimiento de la restricción básica queda garantizado para exposiciones a campos electromagnéticos con intensidades de campo eléctrico $E \leq 5000$ V/m y densidades de flujo magnético $B \leq 100$ μ T. Estos valores corresponden a los niveles de referencia para CEM de 50 Hz.

¿Qué efectos pueden esperarse de exposiciones en el orden de esos niveles de seguridad? Por ejemplo, en un cuerpo humano expuesto a un campo magnético de 100 μ T (Densidad de Flujo Magnético de Referencia para campos de 50 Hz), se produciría por inducción electromagnética un campo eléctrico equivalente en promedio a 5 mV/m. Pues bien, la intensidad de campo eléctrico promedio en la superficie de la membrana celular debida al *ruido térmico*² natural es del orden de 300 V/m, un valor que supera significativamente al inducido por un campo en el límite de los 100 μ T. De acuerdo con la argumentación, la exposición a señales que in-

ducen a nivel extracelular campos eléctricos de intensidad netamente inferior a la de por sí existente a causa del funcionamiento del propio sistema, no podría inducir efecto biológico alguno³.

4- Niveles típicos de exposición a CEM de frecuencia industrial en ambientes no controlados

Denominamos ambientes "controlados" a aquéllos en los cuales las características de los CEM presentes están bien descritas y los niveles de exposición han sido medidos. Se asume que el acceso a esos ambientes puede estar restringido y que las personas que los frecuentan conocen las características y distribución de esos campos, y han sido entrenadas para protegerse de posibles efectos adversos derivados de la exposición en ese ambiente. Los ambientes que

Exposición en espacios públicos

La energía eléctrica de las estaciones generadoras es distribuida hacia los centros de población a través de líneas de transmisión de alta tensión. Mediante el empleo de transformadores, se reduce la tensión en las conexiones con las líneas de distribución doméstica. Los campos eléctricos y magnéticos bajo las líneas de transmisión pueden alcanzar valores de hasta 12 kV/m y 30 mT, respectivamente (Fig. 4).

Exposición en ambientes residenciales

Los niveles de exposición residencial a campos eléctricos y magnéticos dependen de factores como la distancia a líneas eléctricas locales, el número y tipo de electrodomésticos empleados en la vivienda, la configuración del cableado eléctrico de la ca-

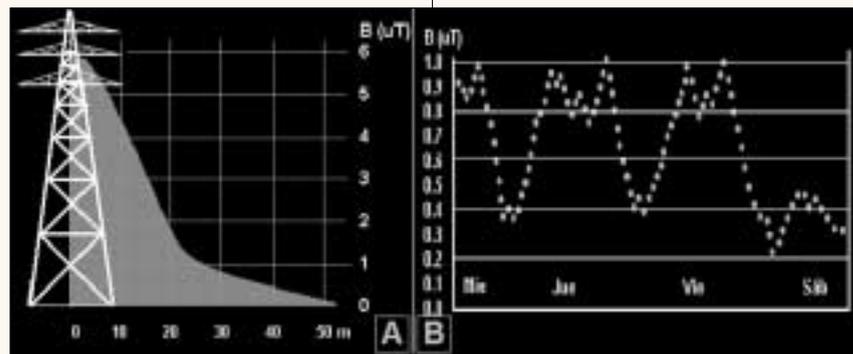


Figura 4. Valores de densidad de flujo magnético (en μ T) medidos en las proximidades de una línea de transmisión ($f = 50$ Hz). En **A** se puede comprobar cómo los niveles se reducen significativamente al aumentar la distancia a la línea. En **B** se muestran los niveles medidos, a lo largo de tres días, en un único punto de una vivienda unifamiliar situada a 30 metros de la misma línea. Como puede comprobarse, los valores de campo registrados dependen directamente de la carga de la línea (mayor en horarios y días laborales)

no cumplan las condiciones descritas entrarían en la categoría de "no controlados". Son estos ambientes y las personas expuestas en ellos el objeto de interés en el presente artículo.

sa, o el tipo de vivienda (unifamiliar, adosada, apartamento). En las inmediaciones de electrodomésticos comunes, los valores de campo eléctrico y magnético raramente superan

² El ruido térmico, propio de cada organismo vivo, es un campo fluctuante, incoherente en el tiempo, provocado por el conjunto de movimientos de cargas eléctricas asociados al normal funcionamiento y metabolismo de las células, tejidos y órganos

³ Sin embargo, algunos expertos, entre los que se encuentra este investigador, han apuntado que tal razonamiento no contempla la posibilidad de que algunas RNI ambientales, por la frecuencia y forma de su señal, y por su duración, tasa de repetición y coherencia en el tiempo, pudieran poseer un significado biológico específico y ser "detectados" por algunas células sobre la incoherencia inherente al ruido térmico. Estos expertos basan sus hipótesis en datos experimentales que constituirían un supuesto respaldo para las mismas.

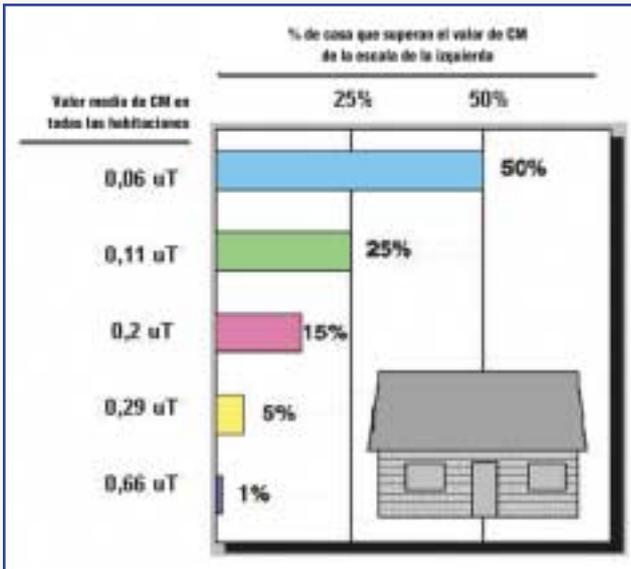


Fig. 5: Valores de campo magnético medidos en viviendas estadounidenses. Se estima que los valores en viviendas europeas son significativamente más bajos debido a las diferencias de tensión y de diseño de las viviendas. En efecto, mediciones realizadas en Francia y Reino Unido muestran que el porcentaje de viviendas cuyo valor promedio de campo es $B \geq 0,3 \mu T$ es muy inferior a 1%

los 500 V/m y los 150 μT , respectivamente. Los niveles de ambos parámetros se reducen notablemente a unos pocos centímetros de estos aparatos dado que los valores correspondientes decrecen con el cuadrado de la distancia a la fuente.

Campañas de mediciones llevadas a cabo en distintos países muestran que el valor promedio de campo magnético registrado en el conjunto de las habitaciones de la mayoría de las viviendas está por debajo de 0,1 μT (Figura 5). En general, debido a diferencias en el diseño de la instalación eléctrica y en la tensión utilizada, los niveles medidos son significativamente más bajos en Europa que en EE.UU.

Exposición en ambientes ocupacionales no controlados

Varios trabajos han estudiado las características de las exposiciones a FI en diversos ambientes ocupacionales. Así, un estudio reciente ejecutado por nuestro equipo (Úbeda y col., 2000) investigó los niveles de exposición en ambientes hospitalarios presumiblemente ricos en campos de bajas frecuencias [10]. Todos los registros se hicieron para señales en el rango 5 Hz – 2 kHz. El análisis del espectro de frecuencias demostró que el componente principal de las señales correspondía siempre a frecuencias de 50 Hz y sus primeros armónicos. En estas frecuencias, la mayor parte (>90%) de los valores puntuales de inducción magnética obtenidos

en el conjunto de los registros era menor o igual a 1 μT . Los máximos medidos correspondieron a picos de corta duración, que alcanzaron niveles próximos a los 40 μT . Esos niveles coinciden, en términos generales, con los encontrados en otros ambientes ocupacionales no controlados.

Los datos obtenidos a partir de mediciones puntuales o de registros tomados en diversas zonas de los ambientes investigados, se ven respaldados por el resultado de estudios de dosimetría personal. En esos estudios, los sujetos voluntarios son invitados a portar un pequeño dosímetro durante sus distintas actividades diarias. La Figura 6 muestra el registro

recibidas tanto en la vivienda o en el trabajo como durante desplazamientos o en la ejecución de actividades de ocio. Como puede apreciarse, el tipo de actividad laboral del sujeto, al igual que la mayoría de trabajos no relacionados directamente con la producción, mantenimiento o transporte de la energía eléctrica, no conlleva la exposición a campos FI intensos. Así, en el presente ejemplo, encontramos que el nivel promedio está muy por debajo de 0,1 μT , con picos de corta duración (segundos - minutos) cuyo valor no suele ser superior a 1 μT .

recibidas tanto en la vivienda o en el trabajo como durante desplazamientos o en la ejecución de actividades de ocio. Como puede apreciarse, el tipo de actividad laboral del sujeto, al igual que la mayoría de trabajos no relacionados directamente con la producción, mantenimiento o transporte de la energía eléctrica, no conlleva la exposición a campos FI intensos. Así, en el presente ejemplo, encontramos que el nivel promedio está muy por debajo de 0,1 μT , con picos de corta duración (segundos - minutos) cuyo valor no suele ser superior a 1 μT .

5- Control de riesgos en exposiciones no controladas a partir de la recomendación europea

A partir de los datos antes resumidos, se concluye que los niveles de exposición a campos FI en la genera-

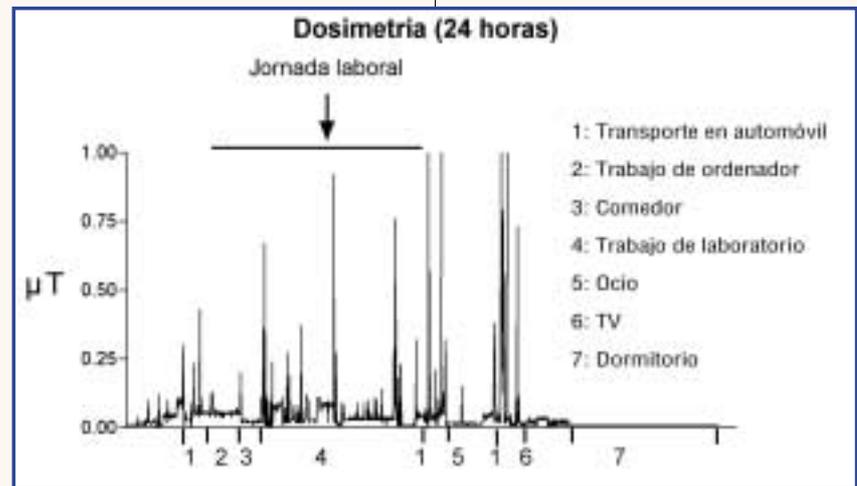


Figura 6. Registro continuo de las densidades de flujo magnético (mT) de distintas fuentes, con frecuencias entre 30 Hz y 1500 Hz, a que estuvo expuesta una persona durante 24 horas de actividad normal entre semana

de exposiciones a campos de frecuencias bajas durante 24 horas en un voluntario (un técnico de laboratorio). El magnetograma describe las características de las exposiciones

de exposiciones a campos de frecuencias bajas durante 24 horas en un voluntario (un técnico de laboratorio). El magnetograma describe las características de las exposiciones

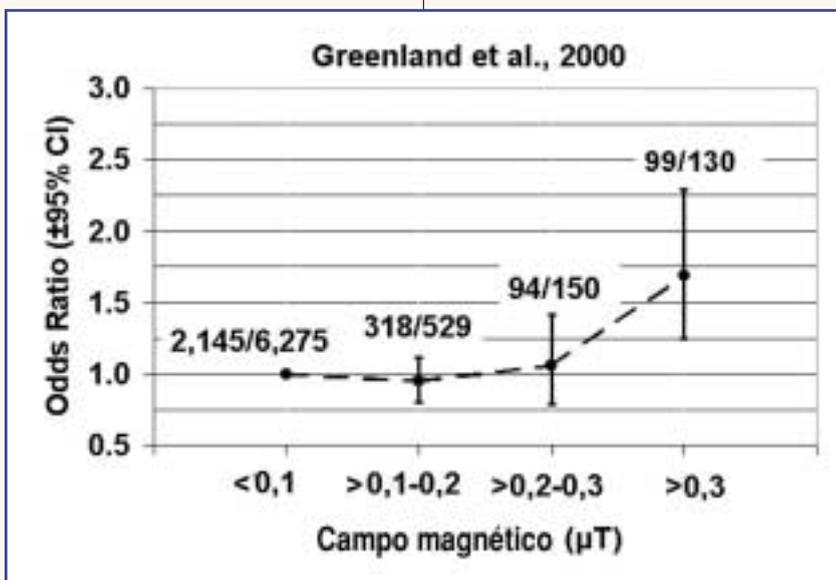
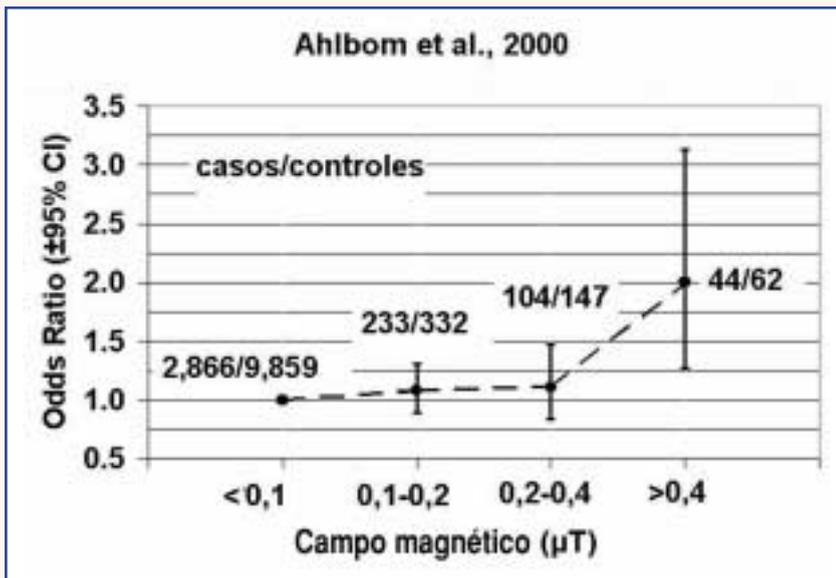


Figura 7: Resumen de los protocolos y resultados empleados en dos análisis integrados de datos epidemiológicos sobre incidencia de leucemia en niños expuestos crónicamente a RNI FI. *Ahlbom et al., Britis J. Cancer, 2000*
 - Nueve estudios con mediciones; dos con código de cables
 - Casos: 3247; controles: 10.400
 - Métrica elegida: media geométrica *Greenland et al., Epidemiology, 2000*
 - 12 estudios con mediciones; cuatro con código de cables
 - Casos: 2656; controles: 7084
 - Métrica elegida: media ponderada en el tiempo

o hipersensibles a la presencia de campos en su entorno.

Epidemiología de leucemia en niños

De los distintos tipos de enfermedades investigadas como potencialmente ligadas a exposiciones a campos FI en ambientes no ocupacionales⁴, la leucemia en niños que habitan viviendas próximas a líneas de alta tensión ha sido la más estudiada hasta el presente y es la que ha proporcionado datos de mayor relevancia. En el año 2000, dos grupos de investigadores publicaron independientemente sus respectivos análisis integrados del conjunto de los datos proporcionados por estudios epidemiológicos precedentes. Ambos análisis, (que se resumen en la Figura 7), llegaban a conclusiones similares: 1) no se encontró incremento en el índice de leucemia en niños expuestos crónicamente a valores promedio $B \leq 0,3 \mu T$, 2) para grupos expuestos a valores superiores a $0,3 \mu T$ o a $4 \mu T$ se registró un incremento significativo en la incidencia de la enfermedad.

Como se desprende de los datos ilustrados en la figura, el tamaño de la población expuesta a los niveles más altos de campo, que mostró una incidencia elevada de leucemia, es muy pequeño⁵. Eso, unido a 1) las fuertes desviaciones de los datos con respecto a la media para los valores B superiores a $0,3 - 0,4 \mu T$ y 2) a la re-

ferencia) recomendados por ICNIRP y el CUE para la protección de los ciudadanos. En estas condiciones, las estrategias a seguir para garantizar la mencionada seguridad consistirían primordialmente en: 1) Protección: Caracterización y control de ambientes en los que las exposiciones pudieran rebasar los niveles recomendados y vigilancia médica de los sujetos expuestos; 2) Prevención: Análisis epidemiológicos de poblaciones expuestas a niveles particularmente altos aunque queden dentro de los límites; investigación experimental sobre mecanismos de respuesta biológica bajo condiciones particulares de exposición; y evaluación permanente de la evidencia que pudiera revelar posibles efectos no detectados en el presente.

De hecho, algunos datos recientes han llevado a nuevos análisis del conjunto de la evidencian científica de interés en radioprotección. En los siguientes apartados resumiremos una selección de esos datos y de su interpretación por parte de comités nacionales e internacionales.

6- Datos recientes sobre potenciales efectos de la exposición a campos magnéticos débiles de FI

Resumiremos la evidencia obtenida de estudios recientes en humanos:

- 1) epidemiología de leucemia en niños expuestos crónicamente a campos FI en ambientes residenciales;
- 2) encuestas sobre casos de sujetos que alegan ser "electrosensibles"

lativamente baja fuerza de asociación (*Odds Ratio*, OR = 1,5 - 2), lleva a los autores a advertir que la asociación observada pudiera también ser producto de un artefacto de selección de las muestras. Asimismo, se está investigando la posibilidad de que el aparente incremento de leucemias observado en las inmediaciones de las líneas de alta tensión no se deba a la exposición a RNI, sino a otros factores ligados a, o coincidentes con, la presencia de las líneas. Tales factores incluyen la densidad del tráfico, la presencia de agentes químicos contaminantes o las características y densidad de la población en esas zonas [14]. En todo caso, hasta el presente no se han identificado artefactos estadísticos en los estudios epidemiológicos comentados, ni se han encontrado pruebas concluyentes sobre factores alternativos a los campos FI, que pudieran justificar las observaciones epidemiológicas. Por lo tanto, estos resultados deben ser tenidos en cuenta en materia de radioprotección.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC-OMS) ha estudiado la evidencia científica sobre potenciales efectos cancerígenos de las RNI de bajas frecuencias, (incluidas las FI), para su clasificación. En la clasificación IARC, se incluyen distintos agentes químicos y físicos en distintas categorías o grupos en función de la certeza científica existente sobre el potencial cancerígeno del agente. Co-

mo muestra la Tabla 2, IARC agrupa los agentes investigados hasta el presente en cuatro categorías: Grupo 1: "El agente es cancerígeno para humanos"; Grupo 2A: "Probablemente es cancerígeno"; Grupo 2B: "Es posible que sea cancerígeno"; Grupo 3: "No es clasificable"; Grupo 4: "Probablemente no es cancerígeno". Para asignar los campos de baja frecuencia a uno de esos grupos, IARC tomo en consideración: 1) Las características y limitaciones de los datos epidemiológicos sobre leucemia en exposiciones residenciales (descritos en este apartado) y sobre cáncer en exposi-

físicos validados que permitan identificar los mecanismos de respuesta que pudieran justificar un efecto cancerígeno de esas RNI⁸.

En virtud de tales consideraciones, IARC ha clasificado los campos de bajas frecuencias dentro de la categoría 2B (posible cancerígeno) con el mismo grado de certeza sobre su potencial cancerígeno que el concedido a agentes como el cloroformo, el café, la fibra de vidrio o los vegetales en vinagre, entre otros.

Otros Comités y Grupos de trabajo nacionales e internacionales, como el US. National Institute of Environ-

Tabla 2: Clasificación IARC⁹

CATEGORÍA	LA EVIDENCIA ES ^a ...	AGENTES Y EJEMPLOS
1: CANCERÍGENO	Suficiente ^b en humanos	87 agentes: Asbestos, benceno, dioxinas, radón...
2A: PROBABLE CANCERÍGENO	Limitada ^c en humanos y suficiente en animales	63 agentes: Formol, radiación ultravioleta (A, B y C)...
2B: POSIBLE CANCERÍGENO	Limitada ^c en humanos y menos que suficiente en animales	236 agentes: Cloroformo, café, campos LF, plomo
3: INCLASIFICABLE	Inadecuada ^d en humanos y limitada ^c o inadecuada ^d en animales	483 agentes, luz fluorescente, sacarina, té, xileno, mercurio
4: PROBABLE NO-CANCERÍGENO	Indicativa de ausencia de efectos cancerígenos en humanos	1 agente: Caprolactam

^a Más información en: <http://193.51.164.11/monoeval/> y <http://monographs.iarc.fr>

^b Suficiente: Se ha observado una relación positiva. El azar, sesgos o factores de confusión pueden ser descartados con un nivel razonable de certeza

^c Limitada: Se ha observado una relación positiva, pero no pueden descartarse el azar, sesgos o factores de confusión.

^d Los estudios disponibles son de calidad, consistencia o potencia estadística insuficientes, o no existen datos sobre carcinogénesis en humanos.

ciones ocupacionales controladas (no incluidos en este artículo); 2) El hecho de que, en su conjunto, la evidencia experimental in vivo o *in vitro* no ha aportado indicios consistentes de una efectividad cancerígena para las RNI débiles de baja frecuencia⁷ y 3) La actual carencia de modelos bio-

mental Health Sciences (NIH) Working Group, el UK National Radiation Protection Board y el California EMF Program, han coincidido con IARC en clasificar el potencial cancerígeno de los CEM de bajas frecuencias y de frecuencia industrial como "posible pero menos que probable".

⁴ Estas dolencias incluyen: Distintos tipos de cáncer y tumores en adultos y niños, muerte fetal temprana, aborto o anomalías pre- o perinatales, y el cuadro de perturbaciones que componen el denominado "síndrome del edificio enfermo" (insomnio, dolor de cabeza, astenia, excitabilidad)

⁵ Este bajo tamaño de la muestra se debe, como ya se apuntó anteriormente, a que la proporción de viviendas con niveles promedio de campo B > 0,3 µT es muy inferior al 1%

⁶ La tasa anual de leucemia en niños es 5/100.000. Por tanto, si a efectos de discusión admitiésemos que la exposición a campos superiores a 0,4 µT fuese un factor de riesgo en esa enfermedad, se calcula que el riesgo anual añadido de que un niño expuesto crónicamente a esos niveles desarrollase la enfermedad estaría entre 1/100.000 y 5/100.000.

La hipersensibilidad electromagnética

La literatura científica ha recogido numerosos casos de personas que alegan sufrir reacciones adversas como dolores inespecíficos, fatiga, disestesias, palpitaciones, depresión, dificultades para dormir, acúfenos¹⁰ y otros síntomas que atribuyen a la exposición a CEM. A este conjunto de perturbaciones se le conoce como "Síndrome de hipersensibilidad electromagnética". Los resultados de los estudios que han investigado estos síntomas son a menudo inconsistentes y contradictorios. Los trabajos de un Grupo de expertos comisionados para estudiar el problema concluyeron que no existe suficiente evidencia sobre una presunta relación causal entre exposición a CEM y la "hipersensibilidad electromagnética". De hecho, se han detectado diversos factores que parecen intervenir en la hipersensibilidad electromagnética; entre ellos se incluye: medio poco hidratado, luz parpadeante, factores ergonómicos, enfermedades previas, síndromes neurasténicos y diversos factores sociales y psicológicos. Un estudio reciente sobre personas consideradas electrosensibles para CEM de frecuencia industrial reveló que, en promedio, estas personas pertenecían a categorías de edad, sociales, educacionales, laborales, de ingresos, de tasa de paro, etc. que no coinciden con la media de la población ni con las medias para personas hipersensibles o alérgicas a diversos agentes. Los autores del estudio interpretan sus resultados como indicativos de la existencia de factores psicosociales implicados en el fenómeno. Esta hipótesis viene reforzada

por observaciones previas que muestran cómo una adecuada estrategia de comunicación e información puede contribuir a la prevención y tratamiento de algunos síntomas relacionados con la hipersensibilidad electromagnética.

7- Influencia de la evidencia reciente en las regulaciones

Para el Control de la Exposición

La mayoría de los Comités nacionales e internacionales para radioprotección ante RNI han valorado el interés de la evidencia reciente, concediendo especial relevancia a los datos epidemiológicos descritos en este artículo. Sin embargo, teniendo en cuenta las indeterminaciones que persisten en los estudios epidemiológicos, así como la ausencia del suficiente respaldo experimental y la carencia de modelos que permitan identificar posibles mecanismos biológicos de respuesta, los Comités han concluido, en general, que la evidencia acumulada no justifica la adopción de límites de seguridad más estrictos que los establecidos por IC-NIP y CUE para la protección del público ante RNI de bajas frecuencias. Así lo expresa el Comité Científico Director de la Unión Europea en Toxicología, Ecotoxicología y Medio Ambiente, en su informe publicado en 2002: "Posible Efectos de los Campos Electromagnéticos Radiofrecuencias y Microondas sobre la Salud Humana". El Comité español de Expertos Independientes (Ministerio de Sanidad y Consumo) en su Informe Técnico de 2003 (en impresión) llega a conclusiones análogas. Los ci-

tados Comités recomiendan, en todo caso, ampliar la evidencia, tanto epidemiológica como experimental, en aquellos aspectos considerados prioritarios para solventar las presentes indeterminaciones y carencias en el conocimiento de los potenciales efectos adversos de los campos de bajas frecuencias.

Entre tanto, la extraordinaria difusión de las interpretaciones que en algunos foros se ha hecho de la evidencia epidemiológica aquí descrita, ha suscitado una seria alarma social, próxima a la fobia, contra las fuentes más conspicuas de campos de FI: las líneas de alta tensión y los centros de transformación. Teniendo en cuenta dicha alarma, algunas Agencias nacionales e internacionales para la radioprotección que respaldan los niveles de seguridad recomendados por IC-NIRP y CUE, como la OMS, han invitado a los gobiernos a desarrollar estrategias efectivas en cuanto a sus costes, para la reducción de la exposición del público a radiaciones no ionizantes ambientales. En respuesta a esa invitación, algunas autoridades locales españolas han iniciado campañas de enterramiento de líneas de AT en zonas urbanizadas con posterioridad a la instalación de las líneas. Es necesario tener en cuenta que esa estrategia (de muy elevado coste en cualquier caso) debe ejecutarse en condiciones apropiadas si lo que se persigue es una eficacia en términos de reducción de la exposición. En caso contrario, el soterramiento podría incluso dar lugar a un incremento en los niveles de exposición en zonas próximas a la línea. ■

⁷ En efecto, la evidencia experimental en su conjunto no ha respaldado las observaciones epidemiológicas. No obstante, conviene tener en cuenta las limitaciones técnicas de algunos estudios, así como el hecho de que no es fácil detectar in vivo efectos cancerígenos sutiles utilizando muestras de tamaño relativamente pequeño, como las empleadas generalmente. Tampoco tenemos plena garantía de que los modelos biológicos empleados hasta ahora fueran los adecuados para revelar una sensibilidad de los campos investigados, ni de que los parámetros y condiciones de exposición fuesen siempre los apropiados.

⁸ Existen varios modelos en desarrollo o en fase de comprobación. Modelos anteriores han tenido escaso éxito en la predicción de resultados.

⁹ Clasificación del 27 de junio de 2001.

¹⁰ Acúfenos o "fenómenos acústicos" designa el fenómeno consistente en percibir ruidos que no existen. Es un tipo de perturbación que afecta al 15-20% de la población, incluidos los niños, y a más del 30% de las personas de edad avanzada. Los ruidos más frecuentemente percibidos se asemejan a los producidos por el tráfico o la televisión, silbidos y zumbidos. Esta dolencia carece de tratamiento eficaz conocido.