

Capítulo 4

Campos electromagnéticos y salud

4.1. Introducción

En los últimos 25 ó 30 años se ha producido una cierta inquietud social hacia los campos electromagnéticos de baja frecuencia y de radiofrecuencia. Esta inquietud se materializa, por un lado, en un temor de que estos campos puedan ser causa o favorecer procesos tumorales; por otro lado son relativamente frecuentes los casos de personas que alegan sufrir reacciones adversas, como dolores inespecíficos, fatiga, disestesias¹, palpitaciones, depresión, dificultades para dormir, acúfenos², y otros síntomas que atribuyen a la exposición a CEM de baja frecuencia; es lo que se conoce como *síndrome de hipersensibilidad electromagnética*. El uso masivo de la telefonía móvil está produciendo casos similares, donde los pacientes atribuyen sus síntomas a la exposición a las ondas de radiofrecuencia del terminal y las antenas fijas.

En este capítulo estudiaremos brevemente la interacción de los campos electromagnéticos con la materia viva, con el objeto de determinar si estos campos electromagnéticos —subproducto de la electrificación o bien elementos esenciales de la comunicación inalámbrica— suponen un elemento nocivo para el medio y hasta qué punto esto es así.

Por tanto, en esta lección pretendemos proporcionar una panorámica de los estudios que se están realizando actualmente para llegar a una conclusión científica al respecto, lejos del ruido de un alarmismo social injustificado —de carácter más supersticioso que racional—, y al cual los medios de comunicación prestan más atención que a los resultados científicos rigurosos.

4.2. Objetivos

- Familiarizarse con la nomenclatura y terminología empleadas en los estudios sobre la influencia de los campos electromagnéticos en la salud.
- Recordar los criterios que los diversos organismos internacionales establecen para los campos CA y radiofrecuencia, así como los valores máximos de exposición que se derivan, tanto en entornos residenciales como ocupacionales.

¹Sensaciones anormales desagradables.

²Con esta palabra se designa el fenómeno consistente en percibir ruidos que no existen.

- Mencionar los distintos procesos físicos que pueden estar presentes cuando las OEM actúan sobre la materia viva y sus posibles efectos biológicos.
- Repasar brevemente el estado actual de las investigaciones realizadas sobre los efectos de las OEM sobre la salud.

4.3. Influencia de los CEM sobre la salud.

Dada la alarma social ante el posible poder carcinogénico de los CEM y OEM de las que hablamos en la Introducción, los científicos se han planteado la posibilidad de que campos y ondas, demasiado débiles para provocar efecto térmico alguno, sí pudieran tener algún tipo de influencia en la fisiología celular. El inicio de la alarma se produjo en 1979 cuando Wertheimer y Leeper (*Am. J. Epidemiol* 109:273) publicaron un estudio donde se relacionaba el aumento de casos de leucemia y cáncer cerebral infantil con ciertos tipos de líneas de alta tensión cercanas a zonas residenciales. Otros trabajos mostraron resultados similares durante los primeros años 80. Sin embargo, estas observaciones han sido recibidas entre la comunidad científica con mucho escepticismo debido a los pocos estudios con mediciones claras de las intensidades de los campos, la ausencia de trabajo de laboratorio que muestre que las radiaciones de los campos electromagnéticos sean cancerígenas y la completa ausencia de un mecanismo biofísico plausible que explique cómo los CEM pueden afectar a los sistemas biológicos. Desde entonces, numerosos comités científicos y grupos de trabajo se han reunido para analizar los datos disponibles concluyendo que no está probado que los CEM tengan un efecto cancerígeno. Sin embargo, como veremos más adelante, con el fin de ser precavidos, la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) ha clasificado las exposiciones a las CEM como “posible cancerígeno humano” (Clase 2B, como el café).

Todavía sigue sin entenderse claramente las causas específicas del desarrollo de los diferentes tipos de cáncer. Sin embargo, los estudios con células mamíferas han mostrado suficiente información acerca de los agentes externos (físicos, químicos o biológicos) que contribuyen a la aparición del cáncer. Existen dos caminos (no exclusivos) en el origen de la aparición del cáncer.

1. Un camino genotóxico³, donde una exposición a un determinado agente ambiental induce una serie de daños en el material genético (ADN) en la célula.
2. Un camino “epigenético” donde ciertos factores ambientales, que pueden o no causar cáncer por sí mismos, pueden contribuir a la aparición de este mediante el aumento de la genotoxicidad de otros agentes.

De esta forma, la genotoxicidad de los campos electromagnéticos debe estudiarse tanto como posible origen del cáncer o como posible elemento que aumente la genotoxicidad de otros agentes que sí son peligrosos, como pueden ser las radiaciones ionizantes.

Básicamente, existen dos formas de estudiar el problema de los posibles efectos cancerígenos de los campos electromagnéticos. Por un lado, pueden realizarse estudios directos, *in vitro*, donde se estudia en laboratorio la influencia que puede tener una determinada radiación

³Capacidad relativa de un agente de ocasionar daño en el material genético, originando efectos biológicos adversos.

sobre algún tipo de estructura biológica como pueden ser células o bacterias. La otra forma de estudio consiste en trabajos de campo, donde se analiza la posible influencia que ha tenido en la salud de la población la exposición a campos electromagnéticos. En los dos siguientes apartados analizaremos ambas aproximaciones.

4.4. Modelo de la materia viva.

A la hora de evaluar cual puede ser el efecto de las OEM en la salud es necesario conocer cual es la interacción entre las ondas y la materia, en concreto, con la materia viva.

Desde el punto de vista del electromagnetismo, la materia viva reúne las siguientes características:

1. Es una disolución iónica, sin portador preferente, que la convierte en un buen conductor electrostático y en un moderado conductor electrodinámico. Se situaría en la columna “Agua salina” de la tabla 1.1. La densidad de portadores de carga es, entonces, $n \simeq 10^{24} \sim 10^{26} \text{ m}^{-3}$ que, suponiendo que aquellas son iones monovalentes ($q \simeq 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), dan lugar a una densidad de carga portadora de $10^5 \sim 10^7 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$ (ver ecuación 1.17). Su conductividad la tomamos directamente de la tabla como $\gamma \simeq 0,1 \sim 10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.
2. Es un medio con actividad eléctrica interna⁴. Los intercambios iónicos en las paredes de las células es un ejemplo de tal actividad. Los sistemas neural y locomotriz tienen una actividad eléctrica especialmente importante, con corrientes que transportan impulsos nerviosos; parte de esa actividad es detectable mediante sutiles cambios de potencial en las regiones donde tiene lugar la actividad: esto es el fundamento de los electrocardiogramas y electroencefalogramas.
3. Es un medio permeable a los campos magnéticos, de acuerdo con la discusión de la página 37.

Este modelo es intencionadamente simple y evita complicaciones tales como las pérdidas dieléctricas del agua a altas frecuencias y la diferenciación de tejidos.

La mayor parte de los efectos que los campos electromagnéticos producen en la materia viva están ligados a las corrientes eléctricas que aquellos sean capaces de inducir, y que pueden interferir con la actividad eléctrica natural o bien causar un calentamiento excesivo por efecto Joule. En la tabla 4.1 se resumen estos efectos.

El umbral de disipación del metabolismo basal es la potencia calorífica (ver discusión sobre el efecto Joule en la página 29) que es capaz de disipar un organismo⁵; para el hombre este umbral está en torno a $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; si el calentamiento específico producido por una corriente eléctrica inducida desde el exterior —según la fórmula 1.26— supera esa cantidad, entonces el tejido aumenta su temperatura porque no es capaz de disipar el exceso de calor. Los valores aproximados de densidad de corriente que se sugieren en la tabla están obtenidos de la ecuación 1.26, con valores de conductividad para una disolución salina obtenidos en la tabla 4.1.

⁴Esta característica se restringe exclusivamente a los animales y todos aquellos seres vivos con sistema nervioso central. Las plantas, por ejemplo, no tendrían esta característica.

⁵Estamos considerando implícitamente a animales de sangre caliente: aves y mamíferos.

Efecto	Densidad de corriente, J
Fosfenos	$20 \sim 100 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$
Estimulación de nervios y músculos	$0,1 \sim 1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
Fibrilación del corazón	$1 \sim 10 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
Calentamiento eq. al metabolismo basal	$10 \sim 100 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$

Tabla 4.1: Efectos biológicos producidos por corrientes eléctricas. Los fosfenos son excitaciones del córtex visual, que se manifiestan en forma de destellos luminosos aparentes, pero cuya causa no es atribuible a destellos reales, sino a otras como golpes en los ojos, alucinaciones por drogas, etc. El calentamiento que se menciona en la última fila es el equivalente al umbral de disipación del metabolismo basal, y es debido al efecto Joule.

A continuación explicaremos algunos de los procesos biofísicos que podrían dar lugar a modificaciones en el comportamiento celular o en los tejidos biológicos. En primer lugar, se descarta por completo cualquier tipo de interacción basada en transiciones atómicas y/o ionizantes, producida por la radiación en esta zona del espectro. Las transiciones atómicas se producen cuando la radiación, considerada como un haz de fotones, es capaz de promocionar un electrón de un estado a otro, y para ello se necesitan energías de fotones⁶ del orden de 1 eV. La energía de un fotón viene determinada por su frecuencia según la fórmula de Planck $E = h f$ (o $E = h\nu$ como habitualmente se suele escribir, donde ν es otra manera de denominar a la frecuencia f) donde h es la llamada *constante de Planck* y tiene un valor de $4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. Si aplicamos la fórmula de Planck a la radiación de máxima frecuencia de esta sección de espectro, 300 GHz, entonces la energía del fotón correspondiente no pasa de ser 1 meV, mil veces inferior a lo necesario para provocar transiciones atómicas⁷. Obviamente, la parte baja del espectro queda fuera de toda consideración.

4.4.1. Campo estático

Un campo estático queda totalmente apantallado por la materia viva, dada la naturaleza conductora de esta última; esto lo vimos en la página 24. En la figura 4.1 se muestra cómo la presencia de una persona modificaría las líneas de campo eléctrico, originariamente verticales.

El fenómeno de apantallamiento sólo está restringido por la cantidad de carga libre disponible. El campo máximo que puede apantallar una capa de material conductor de espesor d , con una densidad de carga ρ es,

$$E_{max} = \frac{\rho d}{\epsilon_0}$$

Si tomamos $\rho \simeq 10^5 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$, entonces el campo máximo apantallable dado por la fórmula anterior es muy grande, incluso tomando espesores de material del orden de milímetros: $E_{max} \sim 10^{14} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, que es mucho mayor que el campo máximo al que puede estar sometido un ser vivo.

Por tanto, concluimos que la materia viva **apantalla perfectamente** el campo eléctrico estático.

⁶Las energías de fotones se suelen expresar en *electrón-voltios* [eV], cuya correspondencia en el sistema internacional es $1,601 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

⁷Por ejemplo, la energía de ionización del átomo de hidrógeno es de 13,6 eV.

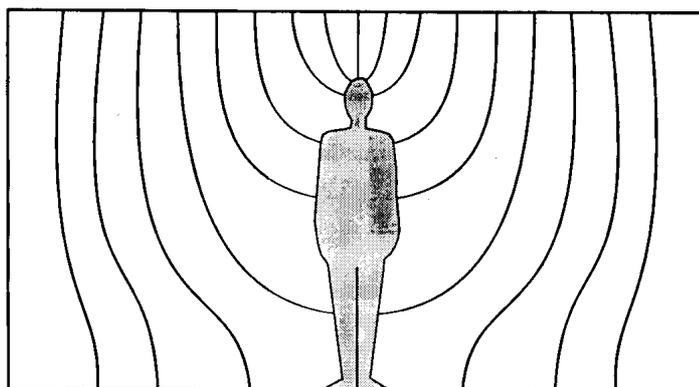


Figura 4.1: Distorsión de las líneas de campo eléctrico terrestre natural causada por la presencia de una persona.

Fuerzas sobre objetos cargados.

Los CEM generan fuerzas sobre las cargas eléctricas. Sabemos que la fuerza de una carga eléctrica ($1,6 \times 10^{-19} \text{C}$) puede expresarse como

$$F = qE$$

Por tanto, supongamos que tenemos una célula de $10 \mu\text{m}$ de diámetro ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$) que “pesa” unos 5pN ($1 \text{pico pN} = 10^{-12}$) en aire. Entonces, sostener una célula como ésta usando un campo de 1V/m supondría que estuviese cargada con 32 millones de electrones.

Los campos eléctricos pueden generar fuerzas en las partículas cargadas, pudiendo moverlas si estas no se encuentran fijas. En tal caso, el material es conductor, y dispondrá, como hemos visto de una corriente \mathbf{J} que será tanto más intensa cuanto mayor sea la conductividad, σ . Por ejemplo, la conductividad de los huesos o la grasa humana es de $0,05 (\Omega\text{m})^{-1}$ y la de la sangre es $0,6 (\Omega\text{m})^{-1}$; conductividades extremadamente bajas en comparación con la del cobre que es del orden de $600000 (\Omega\text{m})^{-1}$.

Otro posible efecto de las fuerzas generadas por los campos sobre las células puede ser aquel que afecte a las “fuerzas biológicas”. Con fuerzas biológicas nos referimos a procesos biológicos celulares que generan algún tipo de dinámica que puede medirse en términos de fuerza. Por ejemplo, la fuerza requerida para extraer una molécula de ADN es del orden de 20pN . En comparación, la fuerza ejercida por una OEM de 1000V/m sobre moléculas cargadas es del orden de 10^{-10}pN , y por tanto, totalmente despreciables en comparación.

4.4.2. Campos oscilantes

Transmisión, reflexión y absorción de las OEM

Las OEM en este rango del espectro se comportan como ondas a todos los efectos. Ya hemos mencionado el fenómeno de la difracción.

En su interacción con la materia se pueden dar tres fenómenos: **Transmisión, reflexión y absorción**.

La materia absorbe parte de la potencia de radiación. En esta parte del espectro, el único mecanismo de absorción es la producción de corrientes inducidas y su disipación en forma de calor. Parece aludir, por tanto, solamente a los conductores; sin embargo en los aislantes también ocurren fenómenos de inducción de corrientes de polarización y pérdidas dieléctricas, especialmente en el agua⁸.

Los conductores anulan el campo eléctrico, como ya hemos explicado. También anulan el campo eléctrico de una OEM aunque, al ser éste variable, el campo eléctrico no llega a anularse totalmente y la fracción que penetra en el material depende de la conductividad del mismo y de la frecuencia de oscilación. En cualquier caso, el material actúa como un freno para la oscilación y produce el mismo efecto en la OEM, que el fijar el extremo de una cuerda produce en las ondas que viajan por la misma: parte de la onda se refleja.

Este fenómeno ya lo vimos al mencionar el efecto de la ionosfera sobre las OEM de la banda HF. Los metales, como buenos conductores, reflejan muy bien las OEM de esta zona del espectro e, incluso, de la zona óptica (infrarrojos, visible y ultravioleta). La materia viva y las disoluciones acuosas reflejan parcialmente las OEM de radiofrecuencia, tanto mejor cuanto menor es la frecuencia.

Los aislantes amortiguan ligeramente el campo eléctrico en virtud del fenómeno de la polarización, por lo que presentan cierta reflectancia a las OEM, aunque mucho menor que un conductor.

La parte de la onda que no es reflejada ni absorbida se transmite al otro lado del objeto. En general, depende del espesor de éste como veremos en la sección siguiente. Para garantizar la conservación de energía, se debe cumplir lo siguiente:

$$1 = \mathcal{T} + \mathcal{A} + \mathcal{R}$$

donde \mathcal{T} , \mathcal{A} , \mathcal{R} son los coeficientes de transmisión, absorción y reflexión respectivamente; por ejemplo, para conocer la intensidad de la onda transmitida, sabiendo el coeficiente de transmisión del material y la intensidad de la onda incidente, S_o , simplemente aplicamos $S_T = S_o \mathcal{T}$ para obtener la intensidad de onda transmitida S_T .

No hay que olvidar que parte de la intensidad de una OEM que llega a un objeto, sufre una difracción si la longitud de onda es mayor o parecida a la dimensión del objeto; por lo tanto, esa parte de onda que “rodea” al objeto no puede considerarse estrictamente como parte de la onda transmitida que no ha sido absorbida o reflejada.

Como ya hemos visto, las OEM se reflejan parcialmente en conductores. Para hacernos una idea del poder reflector, podemos aplicar la expresión 4.7 —que nos daba la fracción de campo que penetraba el material según la conductividad y frecuencia de oscilación del campo externo— en el contexto de la interacción con OEM, donde ahora el campo externo es el que corresponde a la OEM incidente. Por supuesto, este punto de vista es sólo una aproximación oportuna para entender groseramente las bases del proceso; en la práctica, el análisis tiene que considerar otros factores, como el ángulo de incidencia. El campo interno correspondería al campo de la onda absorbida o transmitida.

Puesto que la intensidad de la onda depende del cuadrado de la amplitud de los campos (ecuación 3.7), podemos elevar al cuadrado la ecuación 4.7 para relacionar las intensidades:

⁸La corriente de polarización representa la carga que tiene que desplazarse para provocar la polarización del medio.

$$S_{AT} = S_o \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega \varepsilon_o}\right)^2} \quad (4.1)$$

donde S_{AT} es la intensidad que no se refleja (se absorbe o se transmite), de modo que la intensidad reflejada es $S_R = 1 - S_{AT}$. Expresado en términos de coeficientes de absorción, transmisión⁹ y reflexión:

$$\mathcal{T} + \mathcal{A} = 1 - \mathcal{R} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega \varepsilon_o}\right)^2} \quad (4.2)$$

Ejemplo práctico de aplicación de 4.2 Un buen conductor (un metal) ante una radiación de microondas de 10 GHz; teniendo en cuenta las conductividades de metales (ver tabla 1.1), entonces tenemos que

$$\mathcal{T} + \mathcal{A} \simeq 10^{-20}$$

es decir, que prácticamente toda la onda se refleja.

Si tomamos la misma onda y la hacemos incidir sobre materia viva, con una conductividad promedio de $\sim 1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, entonces el resultado de aplicar 4.2 sería

$$\mathcal{T} + \mathcal{A} \simeq 0,25$$

es decir, que un 25 % de la intensidad de la onda penetra el material, mientras que el 75 % restante se refleja.

Ejemplo práctico de medio con pérdidas dieléctricas El agua pura, con conductividad óhmica muy baja, reacciona a las OEM de 50 GHz de forma tal que el cociente $\gamma/\omega\varepsilon$ vale aproximadamente 1,75, en lugar de $\sim 3 \times 10^{-8}$, que saldría de sustituir formalmente $\gamma \simeq 4 \times 10^{-6}$ (ver tabla 1.1) y $\varepsilon = \varepsilon_o$; lo que da una idea de la magnitud de las pérdidas dieléctricas en el agua a estas frecuencias. El correspondiente coeficiente de penetración sería

$$\mathcal{T} + \mathcal{A} \simeq 0,25$$

que es el mismo resultado obtenido anteriormente, considerando un medio que sí es conductor.

En realidad, la aplicación directa de 4.2 a la materia viva —o, en general, a cualquier sistema en que intervenga el agua—, y en la zona del espectro que no ocupa, es problemática. Ya hemos mencionado que el agua es un líquido polar, es decir, formado por moléculas que presentan asimetría de carga y forman pequeños dipolos eléctricos. Estos dipolos contribuyen a disminuir el campo (ver expresión 1.16) y, además, tienen relativa movilidad con lo que pueden seguir las oscilaciones del campo. Esto se refleja en que la constante ε_o hay que sustituirla por $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o$, donde ε sería la permitividad dieléctrica del agua, pero cuyo valor depende de la frecuencia de oscilación.

Por otro lado, el movimiento de dipolos siguiendo el campo se “relaja” por los choques con otras moléculas, transmitiendo a éstas parte de la energía de oscilación que adquieren; esto redundaría en un aumento de temperatura, similar al del efecto Joule en conductores, y se le

⁹A la suma de los coeficientes de absorción y transmisión podríamos llamarla *coeficiente de penetración*.

puede asignar una cierta “conductividad” que refleja las pérdidas energéticas —o pérdidas dieléctricas— por relajación de los dipolos.

Además, resulta complicado establecer los coeficientes de absorción, transmisión y reflexión para cada tipo de tejido, ya que, en función de su composición y textura, puede presentar distintas reacciones a las OEM de radiofrecuencia. Sin embargo sí podemos concluir un resultado cualitativo general: cuanto mayor es la frecuencia de la radiación (menor longitud de onda), más penetrante es ésta y menor fracción se refleja. En el caso concreto del horno microondas, su frecuencia de funcionamiento, 2,45 GHz, está dentro de una zona de frecuencias que el agua absorbe muy bien (el valor concreto se eligió para que no coincidiera con ninguna frecuencia usada en comunicaciones) debido al detalle de la interacción de los dipolos moleculares del agua con la radiación. Esto quiere decir que prácticamente toda la radiación de esta parte del espectro que penetra en los tejidos **se absorbe**, puesto que la extensión de éstos es generalmente mayor que las distancias de penetración. Por tanto podemos considerar que $\mathcal{T} \simeq 0$ y $\mathcal{A} \simeq 1 - \mathcal{R}$.

Dentro del rango de frecuencias considerado en este capítulo, toda la radiación que se absorbe en un material disipa su potencia en forma de calor. El mecanismo poco importa, pero en resumen, el campo eléctrico de la onda produce corrientes al arrastrar las cargas libres del sistema; estas corrientes disipan calor por efecto Joule o por relajación dieléctrica. Como ya hemos dicho, es este efecto térmico lo que aprovecha el horno microondas para producir calentamiento.

En cualquier caso, son evidentes las dificultades de resolver analíticamente qué fracción de radiación o potencia queda absorbida por el tejido. La solución generalmente es estudiar cada problema concreto por separado, atendiendo a la zona del espectro donde se produce la radiación y el tipo de tejido afectado. Este estudio se puede realizar también experimentalmente, sustituyendo la materia viva con disoluciones y coloides de similares propiedades eléctricas; o también mediante simulación con ordenadores.

En realidad, el factor que nos interesa conocer no es directamente la potencia absorbida por el tejido, sino lo que hemos denominado *calentamiento específico* (ver página 30), esto es la potencia absorbida por unidad de masa del tejido.

En el contexto de interacción con las OEM, este parámetro lo denominamos **tasa de absorción específica**, que también se conoce como SAR, acrónimo inglés de *Specific Absorption Rate*, y que evaluaríamos como:

$$\text{SAR} = \frac{P_{\text{ab}}}{m}$$

donde P_{ab} es la potencia absorbida según lo discutido en el párrafo anterior y m es la masa de tejido afectado, teniendo en cuenta la penetración de la onda y las posibles inhomogeneidades del medio.

Los criterios de dosimetría, que discutiremos más adelante, tienen como horizonte que el SAR máximo que puede absorber un tejido sin sufrir aumento de temperatura es de $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, que es el umbral de disipación del metabolismo basal, como ya discutimos en la página 83.

En definitiva, hemos visto que los campos eléctricos procedentes de líneas de alta tensión, transformadores, etc, son apantallados por los objetos conductores, de forma que estos poseen poca capacidad para penetrar en edificios o tejidos biológicos. Sin embargo, los efectos térmicos pueden tener un efecto así como los campos magnéticos, asociados con los campos eléctricos, que sí que pueden penetrar en edificios o tejidos biológicos, con la consecuente dificultad a la

hora de apantallarlos. En general, la energía térmica absorbida por los tejidos suele ser pequeña en la mayor parte de las situaciones de riesgo, de manera que se suele considerar que, en caso de que existiesen, los posibles efectos biológicos debidos a las OEM de baja frecuencia, deberían proceder de su componente magnética o de las corrientes o campos eléctricos inducidos por los campos magnéticos en el cuerpo. Más adelante en este capítulo analizaremos con más detalle estos puntos.

Transmisión de una onda en un conductor La amplitud de campo eléctrico que se propaga en la dirección x en un medio conductor toma la siguiente forma:

$$E(x) = E_o e^{-\frac{x}{\delta}}$$

donde E_o es la intensidad de campo que ha penetrado en el material —ya está descontada la fracción reflejada— y δ es un parámetro denominado **distancia de penetración**, que nos dice que cuando la onda ha avanzado una distancia $x = \delta$, entonces la intensidad de campo ha disminuido una fracción $e^{-1} \simeq 0,37$.

Tomando la expresión anterior al cuadrado, obtenemos cómo varía la intensidad de la onda:

$$S_T(x) = S_{AT} e^{-\frac{2x}{\delta}} \quad (4.3)$$

con lo que vemos que la onda se va atenuando exponencialmente a medida que atraviesa el material, de forma que cuando ha recorrido una distancia equivalente a la distancia de penetración, δ , entonces la intensidad ha disminuido hasta el 13%.

Por tanto, la fracción total de intensidad transmitida depende del espesor del material. Podemos concluir que, para un espesor de material L ,

$$\mathcal{T} = (1 - \mathcal{R})e^{-\frac{2L}{\delta}}, \quad \mathcal{A} = (1 - \mathcal{R}) \left(1 - e^{-\frac{2L}{\delta}}\right)$$

La distancia de penetración, δ , depende del material —conductividad, permitividad— y de la frecuencia de la radiación. Si consideramos sólo la materia viva y otros malos conductores, entonces δ viene dada por:

$$\delta = \frac{2}{\gamma} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_o}} \quad (4.4)$$

Aquí la dependencia con la frecuencia no es explícita, pero se manifiesta en la dependencia de γ y ε con la frecuencia, como hemos discutido que ocurre con las disoluciones acuosas. Con estas consideraciones, la distancia de penetración puede variar, dependiendo del tipo de material y de la frecuencia, entre 1 mm y 10 cm¹⁰.

Interacción con otros materiales Nos hemos centrado en los conductores porque en una primera aproximación lo que nos interesa es la interacción de OEM con la materia viva, que ya sabemos se caracteriza por ser conductora. Pero también es importante conocer la interacción de OEM con cualquier tipo de material —conductor o no— para ver cómo los diferentes objetos reaccionan al campo.

¹⁰Hay que tener en cuenta que la expresión 4.4 es válida sólo bajo la condición $\gamma \ll \omega\varepsilon$. Si las condiciones de pérdidas dieléctricas del medio son elevadas, o si la conductividad es elevada, entonces 4.4 no se aplica. En estos casos, la profundidad de penetración suele ser menor que el milímetro.

Los objetos metálicos reflejan prácticamente toda la radiación, salvo que sean pequeños en comparación con la longitud de onda y entonces parte de la onda se difracta (esto es, “rodea” al objeto).

Los aislantes tienen un comportamiento más complejo, pero en general son más transparentes a la radiación en esta zona del espectro; es decir, reflejan menos radiación y la profundidad de penetración de la misma es mayor (en virtud de la ecuación 4.4). En menor medida que el agua, los aislantes también presentan el fenómeno de pérdidas dieléctricas y la respuesta de su polarización depende de la frecuencia de la onda; en general podemos aplicar el principio de que a mayor frecuencia de oscilación, más opacos a la radiación se vuelven los medios dieléctricos.

A la hora de analizar, por ejemplo, la influencia de los muros y mobiliario de un edificio tenemos que tener en cuenta su composición, su disposición, su tamaño, etc. Por ejemplo, los muros están formados principalmente por materiales que son aislantes eléctricos: cemento, ladrillo, plástico, vidrio, etc; pero también cubren vigas y forjados metálicos que son conductores. Por eso, los edificios suponen un obstáculo parcial para las OEM. El parámetro de profundidad de penetración, aunque elevado, hace que la onda se atenúe al atravesar los muros de los edificios como hemos visto en la ecuación 4.3.

Energía asociada a los campos

Hemos visto que si suponemos una conductividad promedio para el tejido de 1 S/m, tenemos que un 36 % de la intensidad de la onda penetra en el material. Esta cantidad puede parecer elevada, pero esto depende de la intensidad de la onda electromagnética y con que la comparemos. Como vimos en la expresión 3.4, la energía por unidad de volumen asociada a un campo eléctrico es:

$$\frac{\epsilon}{2} E^2 \quad (4.5)$$

donde ϵ es la constante dieléctrica del medio. Por ponernos en números, la energía eléctrica (por unidad de volumen) asociada a un campo típico de 10 kV/m, es 4×10^{-6} J/m³. Para la parte magnética de la onda, la expresión de la energía por unidad de volumen es similar:

$$\frac{1}{2\mu} B^2 \quad (4.6)$$

donde μ es la permeabilidad magnética. En este caso, un campo típico de 0,1 mT nos proporciona una energía por unidad de volumen de 4×10^{-3} J/m³

La energía cinética y térmica contenida en los tejidos de la materia viva es del orden de 2×10^8 J/m³. Un factor 10^{10} mayor que las cantidades anteriores. Por tanto, las ondas electromagnéticas a las que estamos expuestos habitualmente tienen una energía demasiado pequeña, de por sí, como para producir una influencia energética directa sobre los tejidos. Sin embargo, en lo anterior no estamos teniendo en cuenta cual sería el efecto que tendría sobre la materia viva la incidencia de una OEM con frecuencia ω distinta de cero.

Campo interno y externo.

Los conductores —en particular la materia viva— también apantallan el campo oscilante, pero ahora su capacidad de apantallamiento depende de la *conductividad* del material, como era de

esperar puesto que estamos ante un fenómeno dinámico. Será tanto mejor el apantallamiento cuanto mayor sea la conductividad γ , y, para una conductividad dada, el apantallamiento será peor cuanto mayor sea la frecuencia de oscilación, porque a las cargas del medio les cuesta más reaccionar a los cambios externos.

La relación entre el campo interno y el campo externo, si éste es oscilante, viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{E_{int}}{E_{ext}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\epsilon_0}\right)^2}} \quad (4.7)$$

Obviamente, esta relación se aplica tanto a las amplitudes como también a los valores RMS de los campos. Para bajas frecuencias, $f < 300$ kHz, la fórmula anterior se puede aproximar por,

$$\frac{E_{int}}{E_{ext}} \simeq \frac{\omega\epsilon_0}{\gamma}$$

donde se ve explícitamente la dependencia con la frecuencia y la conductividad. Por ejemplo, tomando una conductividad típica de una disolución salina $\gamma \sim 1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ y la frecuencia de red $\omega \simeq 314 \text{ s}^{-1}$ tenemos que

$$E_{int} \simeq 10^{-9} E_{ext}$$

es decir, el campo interior es mil millones de veces inferior al campo exterior; si tomamos un valor de campo exterior de $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, que es uno de los campos más elevados al que puede estar sometida una persona en un ámbito doméstico (ver el apartado anterior), entonces $E_{int} \sim 1 \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$, lo que corresponde a una densidad de corriente $J \sim 1 \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ que está muy por debajo del nivel de activación de cualquier proceso biológico (ver tabla 4.1).

Ruido Térmico

Existen una serie de mecanismos biofísicos que pueden incidir en el comportamiento eléctrico de las células. Por ejemplo, las células sufren de ruido eléctrico. Esto es, como contienen iones y moléculas cargadas eléctricamente que se mueven de forma aleatoria en su interior, este movimiento produce campos eléctricos que varían de forma aleatoria. Las trayectorias caóticas de los iones generan entonces un ruido eléctrico que depende de la temperatura (ruido térmico), en concreto del factor kT , donde $k=1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en kelvin ($27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$). Puede evaluarse el campo eléctrico medio asociado a este ruido a través de la expresión siguiente:

$$E_{kT} = \sqrt{\frac{4\rho k T \Delta f}{d^3}} \quad (4.8)$$

donde ρ es la resistividad, Δf es el ancho de la banda de frecuencia que nos interesa. Sin entrar en más detalles, en esta fórmula se ha aproximado el el tejido a un cubo de lado d de una resistencia R tal que $R = \rho \times \text{longitud}/\text{area} = \rho/d$.

Nótese que el ruido del campo eléctrico depende inversamente de las dimensiones del tejido, $E \sim d^{-3/2}$. Cuanto menor sea la dimensión del tejido, mayor será el valor de este campo eléctrico. Para saber cual es el valor de este campo dado un cierto valor del voltaje aplicado podemos emplear que, en este modelo simplificado, $V_{kT} = E_{kT} \cdot d$.

Supongamos una célula a temperatura ambiente ($kT = 4,28 \times 10^{-21}$ J) y que el ancho de frecuencias que nos interesa es $\Delta f = 100$ Hz, ancho que incluye las frecuencias de 50 a 60 Hz. Para la membrana celular se puede obtener que $R \sim 10^8 \Omega$ y que $d = 5$ nm. Entonces, el campo eléctrico asociado al ruido sería igual a $E_{kT} = 2600$ V/m.

Es decir, un campo eléctrico sobre la membrana de la célula del orden de 3×10^3 V/m podría afectar al comportamiento de esta, debido a la variación en el ruido térmico generado por el movimiento caótico de iones y moléculas cargadas.

Campo magnético: efecto Hall

Asumamos que la actividad neurológica y locomotriz genera corrientes eléctricas del orden de $\sim 1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ (como sugiere la tabla 4.1); a falta de más información sobre la naturaleza de esas corrientes, podemos suponer que están soportadas por portadores de un solo tipo¹¹. Bajo la acción del campo más intenso posible, $B \simeq 1 \text{ T}$, el campo eléctrico transversal que producen estas corrientes, según la fórmula 1.35 es $E_t \simeq 10 \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$.

El movimiento de fluidos en cuyo seno están disueltos iones, puede producir un campo transversal en presencia de un campo magnético a partir de la fórmula 1.34. El fluido que más rápidamente se desplaza en un organismo vivo es la sangre, principalmente a la salida de la arteria aorta donde su velocidad alcanza los $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; con los campos magnéticos más intensos se producen entonces campos eléctricos del orden $E_t \simeq 1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

Inducción magnética

El campo alterno, por su facilidad para inducir corrientes en conductores, sí es un agente que potencialmente puede interferir la actividad biológica.

En primer lugar, determinaremos la capacidad de la materia viva para rechazar el campo magnético oscilante. Recordemos que los conductores presentan cierto diamagnetismo ante campos magnéticos oscilantes, en virtud de que las corrientes inducidas se oponen a los cambios de flujo. La ecuación 2.7 nos da la razón entre las amplitudes de los campos externo e interno en función de la frecuencia; cuando ésta se mantiene en los límites que hemos fijado, la expresión mencionada se puede aproximar por:

$$\frac{B_{int}}{B_{ext}} \simeq 1 - \frac{(r^2 \omega \gamma \mu_0)^2}{2}$$

Para la frecuencia doméstica, $\omega \simeq 314 \text{ s}^{-1}$, y conductividades típicas de tejidos biológicos, $\gamma \simeq 1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, y radio de actuación del campo, $r \simeq 1 \text{ m}$, tenemos que

$$\frac{B_{int}}{B_{ext}} \simeq 1$$

con lo que no hay apenas exclusión de campo por diamagnetismo inducido.

Analicemos ahora la magnitud de las corrientes de Foucault inducidas, que vienen dadas por la fórmula 2.6; para frecuencias domésticas, conductividades habituales de material biológico,

¹¹Si estuvieran soportadas por portadores positivos y negativos, entonces el campo Hall tendería a compensarse, como se discute en la página 38.

campos alternos del orden de 1 mT (que son los máximos campos domésticos a los que podemos estar sometidos, según la figura 2.8) y tamaño de la zona de actuación del campo equivalente a un cuerpo humano $r \simeq 1$ m, entonces la fórmula mencionada nos da una magnitud de corrientes inducidas $J = 10 \sim 100 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ que entra dentro de los límites inferiores de interferencia con la actividad biológica, de acuerdo con la tabla 4.1.

En situaciones menos extremas —con campos magnéticos más moderados, del orden de $\sim 1 \mu\text{T}$, que corresponderían a campos ambientales típicos teniendo en cuenta la distancia habitual de separación de las personas a las fuentes del campo (ver figura 2.8)— las corrientes inducidas quedan muy por debajo de los umbrales de efectos biológicos.

Otros efectos asociados a campos magnéticos.

Ciertos estudios científicos han mostrado que existen cristales (de tamaño nanométrico) puros de magnetita contenidos dentro del cerebro humano. La magnetita interacciona con el campo magnético, de forma que se ha argumentado que es posible que estos cristales interaccionasen con los campos magnéticos externos asociados a las OEM a las que nos vemos expuestos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que haría falta una gran cantidad de cristales de este tipo para vencer, al menos, el efecto del ruido térmico. Además, si este efecto fuese apreciable los cristales deberían responder al campo magnético de la Tierra y producir efectos a medida que nos movemos y nuestra orientación respecto al campo va cambiando. Este efecto sería algo que, en el supuesto caso de que ocurriese, solaparía el efecto de la componente magnética de las OEM.

Otros autores indican que los campos magnéticos pueden afectar a la recombinación de radicales libres y aumentar su tiempo de vida. Dado que existen estudios que afirman que los radicales libres tienen un papel en el daño genético, se argumenta que la incidencia de un campo magnético puede provocar un aumento de la presencia de los radicales aumentando el posible daño genético. Sin embargo, a efectos de recombinación de los radicales libres, serían necesarios campos con frecuencia superior a 10^5 Hz, algo que no ocurre para las OEM a las que estamos expuestos normalmente.

Transitorios

Cuando alteramos el estado estacionario de un circuito —por ejemplo, encendiéndolo o apagándolo— u ocurre una disrupción eléctrica —como la caída de un rayo— se produce una variación brusca de las fuentes electromagnéticas —potenciales, corrientes...— hasta que el sistema recupera la estabilidad en su nuevo estado.

Estos cambios bruscos se pueden analizar en términos de componentes armónicas de distinta frecuencia, en lo que se llama *análisis de Fourier* o también *análisis espectral*. Las características comunes del análisis armónico de un proceso transitorio son:

- La componente de frecuencia más baja es la que corresponde a $\omega \simeq \tau^{-1}$, donde τ es tiempo en que tarda en llevarse a cabo el proceso de cambio.
- La componente de frecuencia más baja es también la más intensa, siendo la intensidad de los armónicos decreciente a medida que éstos suben en frecuencia.

Los campos asociados a las diferentes componentes armónicas oscilan a la misma frecuencia que éstas y son proporcionalmente intensos a sus amplitudes.

Es decir, podemos tener campos oscilando a frecuencias superiores a la que cabría esperar¹² cuando se producen cambios en las condiciones de un circuito y durante el breve intervalo de tiempo en el que ocurre la transición.

Fenómenos resonantes

La resonancia es un fenómeno mediante el cual una acción muy débil y oscilante puede producir un efecto relativamente grande en un sistema. Para ello tiene que ocurrir que la frecuencia de oscilación de la perturbación externa sea igual a alguna frecuencia característica del sistema, que se denomina precisamente *frecuencia de resonancia*. Por ejemplo, una nota cantada cerca de un piano hará que las cuerdas a la que corresponda esa nota y sus armónicos vibren ligeramente sin necesidad de tocarlas, porque la frecuencia de la nota cantada coincide con alguna de las frecuencias de vibración de las cuerdas involucradas¹³; dése uno cuenta de lo débil que es la acción del aire vibrante sobre la cuerda y, sin embargo, consigue hacerla vibrar, siendo un objeto relativamente pesado.

Este fenómeno podría ocurrir en la interacción de campos oscilantes con los seres animados. Ya hemos visto la ínfima influencia de los campos habituales CA sobre el organismo; sin embargo, puesto que esta acción ocurre con un frecuencia de oscilación determinada, podría estar reforzando la actividad biológica que tiene lugar con esa misma frecuencia.

En la figura 4.2 se observa el análisis espectral de un electroencefalograma (EEG), que tiene lugar en un rango de frecuencias dentro del cual se encuentra la frecuencia de red de 50 Hz. Quiere esto decir que la acción de los campos CA podría reforzar la componente de 50 Hz de la actividad neurológica en virtud de algún mecanismo resonante.

Actualmente se están investigando posibles mecanismos resonantes de interacción de CEM de baja frecuencia con la materia viva. Un mecanismo razonable es una resonancia denominada **resonancia iónica de ciclotrón**. Consiste en una resonancia de la trayectoria circular de determinados iones bajo la acción del campo magnético terrestre —cuya frecuencia de ciclotrón está dada por fórmula 1.32—, con el campo magnético CA de baja frecuencia (50 – 60 Hz) producido por la electricidad doméstica. Según vimos en el capítulo 2, estos campos CA son muy débiles; sin embargo, si su frecuencia coincide con la frecuencia de ciclotrón del ion considerado, entonces la acción del campo CA puede verse incrementada.

Los iones de interés en este modelo son aquellos que, por una parte tienen importancia fisiológica y, por otra, tienen una relación carga/masa compatible con frecuencias próximas a la de oscilación de la electricidad doméstica bajo la acción del campo geomagnético. Por ejemplo, el ion Ca^{2+} presenta frecuencias de ciclotrón entre 22 y 53 Hz. Algunos investigadores han propuesto este fenómeno como un mecanismo que facilitaría la migración de los iones por la membrana celular, aunque los datos experimentales no han confirmado estas expectativas.

¹²El caso del rayo es de un interés particular porque la disrupción es tan fulminante (τ es muy pequeño) que las componentes armónicas tienen frecuencias muy elevadas, incluso dentro del rango de las OEM de radiofrecuencia, con lo que produce interferencias en los canales públicos de radio. Es un fenómeno que casi todo el mundo ha observado alguna vez.

¹³Por ejemplo, si cantamos un Do vibrarán las cuerdas del piano correspondientes a las distintas octavas de Do y también a las de Sol, que son los armónicos principales; algunas más vibrarán de forma más débil.

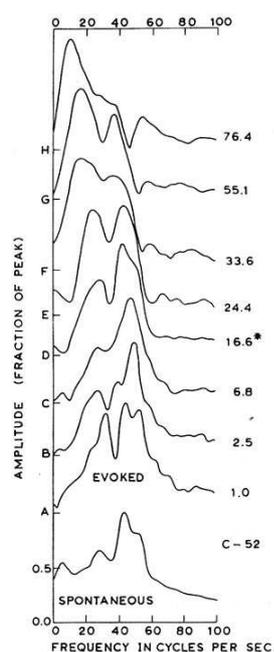


Figura 4.2: Análisis espectral de un electroencefalograma.

A partir de este modelo, se han elaborado otros más complejos basados en el mismo fenómeno de la resonancia de campos magnéticos CC y CA, entre los que destaca el modelo IPR (del inglés *Ion Parametric Resonance*) propuesto originalmente por Lednev¹⁴. Este modelo produce efectos en sistemas biológicos para ciertas combinaciones de amplitudes y frecuencias de campos magnéticos CA y CC. Esta teoría está basada en la asunción de que la interacción de campos magnéticos débiles con los sistemas biológicos es “anómala” debido al bajo contenido energético de estos campos magnéticos comparados con las energías térmicas. Lednev argumenta que la teoría muestra cambios en el sistema energético de los iones, mostrando resonancia y, por tanto, efectos biológicos para ciertos valores de los campos aplicados.

Se han realizado varios experimentos para encontrar estas respuestas resonantes, siendo los resultados no concluyentes ya que numerosos experimentos han encontrado resultados negativos y solo unos pocos han mostrado resultados en situaciones muy concretas. Por ejemplo, cultivos de un tipo de células denominadas *neuritas*, en condiciones controladas de determinados campos CA y CC, muestran algunas anomalías en su crecimiento¹⁵. En cualquier caso, existen dudas a la hora de aplicar esta teoría porque aún no se dispone de un nexo adecuado entre las teorías físicas y la biología de la célula. Por ejemplo, no es conocido como pueden influir las variaciones físicas que indica este modelo, tales como las variaciones de los niveles energéticos de los iones o de la orientación de sus momentos angulares, en la química de las proteínas.

En definitiva, la conclusión actual en cuanto a la influencia que pueden tener las OEM de baja frecuencia sobre sistemas biológicos no está clara debido a que no se conocen los mecanismos

¹⁴“Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems.” *Bioelectromagnetics* 12, 71-75 (1991)

¹⁵Hay un grupo español muy activo en este línea de investigación, liderado por los Doctores Alejandro Úbeda Maeso y M^a Ángeles Trillo Ruiz, del Serv. Investigación-BEM del Hospital Ramón y Cajal.

que puedan dar lugar a algún efecto. Las teorías desarrolladas en la actualidad no predicen efectos a priori, no propocionan resultados biológicos a partir de la introducción en el modelo de los datos correspondientes a las OEM aplicadas.

4.5. Estudios experimentales

En esta sección resumiremos algunos de los avances recientes en la experimentación en torno a la influencia de las OEM de baja frecuencia en aspectos biomédicos.

4.5.1. Estudios *in vitro*

Los estudios *in vitro* consisten básicamente en exponer a células humanas o mamíferas a a campos electromagnéticos con el fin de analizar su posible genotoxicidad. Estos modelos experimentales son idóneos para estudiar los bio-efectos de las ondas. Este tipo de estudios avanza en el conocimiento fundamental de la influencia de la exposición a nivel celular, sin embargo las posibles conclusiones obtenidas son difícilmente extrapolables en términos de seguridad y salud.

Sabemos que la energía fotónica de las radiaciones de radiofrecuencia son demasiado débiles como para romper uniones químicas, y es aceptado que estas radiaciones no dañan directamente a la molécula de ADN. Los estudios experimentales buscan más bien detectar alteraciones del metabolismo celular que aparezcan debido a la radiación aplicada.

Según publican los autores Vijayalaxmi y G. Obe¹⁶, durante los años entre 1990 y 2003 se realizaron una serie de investigaciones con células humanas expuestas a campos de baja frecuencia de los cuales, según estos autores, de 63 trabajos científicos analizados, 26 de ellos (46 %) no indican ningún aumento en el daño del material genético, mientras que 14 (22 %) sí que parecen mostrar algún tipo de daño en las células. Para las otros 20 trabajos (22 %) los resultados no son concluyentes. En cualquier caso, estas comparaciones de trabajos medidas al peso no son el método más adecuado de valorar los trabajos científicos. Muchas veces, los protocolos experimentales o el análisis de los resultados son criticables desde distintos puntos de vista, de manera que algunos trabajos se pueden considerar más fiables que otros

Existen algunos datos experimentales, pertenecientes al proyecto REFLEX¹⁷ que indican la posibilidad de rupturas de ADN tras la exposición a señales típicas de la telefonía móvil. Sin embargo, estos resultados no han conseguido reproducirse de nuevo en laboratorio.

En un estudio *in vitro* sobre cultivos de fibroblastos y linfocitos humanos ¹⁸, se observa un aumento del daño en el ADN de los fibroblastos. De nuevo, el artículo ha sido también criticado ampliamente debido a la metodología estadística empleada. Un resultado en cierto modo inverso a este observó un efecto de reparación de ADN en linfocitos humanos¹⁹. Este estudio es a su vez criticable porque se realizó en una muestra muy pequeña (10 voluntarios

¹⁶Bioelectromagnetics 26:412 2005

¹⁷“*Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Frequency EMF Exposure Using Sensitive in vitro Methods (2004)*”

¹⁸“*Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes*” Schwarz C. et al. Int Arch Occuo Environ Health 2008 81(6):755

¹⁹“*Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes*” Belyaev IY et al, Bioelectromagnetics

y 10 personas que afirmaban tener hipersensibilidad a los campos EM) y se refiere a efectos encontrados sólo en algunos de los pacientes.

En general, puede decirse que los estudios no encuentran que las OEM de baja frecuencia tengan algún efecto cancerígeno por si mismas; sin embargo, sí que pueden ser un factor que aumente el daño del ADN o que puedan tener una influencia en procesos genotóxicos ya iniciados.

Por ejemplo, R.J. Mairs y colaboradores mostraron en 2007²⁰ que los campos magnéticos y eléctricos que aplicaron sobre células humanas aumentaban la capacidad mutagénica, después de aplicar radiación de rayos γ , en un factor $\sim 2,7$. Otros factores que se han estudiado en este sentido son la influencia de la radiación en muerte celular programada (apoptosis), en la modulación de la regulación genética, en la cinética del ciclo celular, etc. Estos trabajos han venido mostrando mayoritariamente una ausencia de evidencia clara de la influencia de la radiación. No obstante, algunos trabajos publicados recientemente, llevados a cabo con metodologías avanzadas, han mostrado indicios de respuestas celulares (inducción de micronúcleos, roturas en el ADN, cambios en la expresión y fosforilación de proteínas) a señales GSM con intensidades iguales o próximas a los límites internacionales de seguridad. Estos datos, aunque de interés evidente en el estudio de respuestas biológicas no térmicas, son actualmente considerados de relevancia limitada para la evaluación precisa y directa de riesgos en humanos expuestos. En cualquier caso, las investigaciones en este sentido sigan su curso.

4.5.2. Estudios *in vivo*

Estos estudios consisten en experimentación con animales, normalmente ratas y ratones de laboratorio. Esta experimentación tiene la ventaja de sus resultados puede que presenten una mayor relación con los posibles efectos sobre la salud de los humanos que los estudios *in vitro*. Por contra, el control de las condiciones experimentales y los niveles de exposición es notablemente más complicado, lo cual puede llevar a resultados o conclusiones equivocadas o no concluyentes.

El estudio *in vivo* más ambicioso realizado hasta el momento finalizó en 2007 y se denominó PERFORM A²¹. Este proyecto estaba compuesto de 4 subproyectos con modelos experimentales distintos cada uno de ellos (PERFORM A1-A4). Los animales eran expuestos a señales típicas de telefonía móvil 2 horas al día, 5 días a la semana, durante 2 años. Para mejorar la exposición algunos de los animales estaban embutidos en contenedores de plástico que impedían que se movieran. El proyecto determinó que no se habían observado evidencias de la influencia de la exposición en 3 de los 4 subproyectos. Solo en uno de ellos se observó una respuesta al investigar los efectos de las radiofrecuencias sobre la respuestas en tumores mamarios inducidos por un potente producto carcinógeno. La primera crítica que se puede realizar a este proyecto es la influencia de la limitación de los movimientos de los animales, que podría influir en los resultados. De hecho, el propio estudio encontró diferencias entre los animales totalmente inmovilizados y aquellos que estaban simplemente enjaulados.

²⁰“*Microsatellite analysis for determination of the mutagenicity of extremely low-frequency electromagnetic fields and ionising radiation in vitro*”, Mutation Research 626, 34 (2007).

²¹“*In Vivo Research on Possible Health Effects of the Use of Mobile Telephones and Base Stations (Carcinogenicity Studies in Rats and Mice)*”

Con respecto a este subproyecto mencionado, se han realizado experimentos más detallados bajo esas condiciones, siendo los resultados no concluyentes. Se considera que los posibles efectos observados se deben a la elevada variabilidad biológica del modelo utilizado. No se observa, en cualquier caso, un efecto de la radiación aplicada en la evolución de los tumores.

Otro tipo de efectos que se están estudiando actualmente son los efectos sobre el sistema nervioso (cambios en la actividad electroencefalográfica, por ejemplo), así como en efectos sobre el desarrollo de los animales cuando son expuestos en la fase prenatal.

4.5.3. Efectos en humanos

Se han encontrado una serie de evidencias de posibles efectos en voluntarios de la exposición a señales de radiofrecuencia en laboratorio sobre el patrón electroencefalográfico, en la estructura del sueño o en ciertos aspectos cognitivos. No se sabe si estos efectos pueden influir en el comportamiento o la memoria o si pueden desencadenar patologías. Otro punto de investigación es el efecto de la exposición sobre la caída de la presión sanguínea. Este efecto no ha sido observado, pero sí que se han constatado incrementos en el flujo sanguíneo en el oído externo en voluntarios, aunque este efecto se piensa que es debido a la vaso-dilatación debida a la transmisión de calor producida por el funcionamiento del teléfono.

Algunas personas afirman que sufren de una serie de síntomas tales como dolor de cabeza, mareo, fatiga o insomnio que aparecen cuando están expuestas a señales de radiofrecuencia. Los pacientes que alegan la sintomatología descrita se dice que sufren del *Síndrome de Hipersensibilidad Electromagnética Percibida*. De los estudios realizados hasta el momento, que incluyen experimentos de doble ciego, se concluye que no existe suficiente evidencia sobre una presunta relación causal entre exposición a CEM y el mencionado síndrome. De hecho, se han detectado diversos factores que parecen intervenir en esta sintomatología; entre ellos se incluye: medio poco hidratado, luz parpadeante, factores ergonómicos, enfermedades previas, síndromes neurasténicos y diversos factores sociales y psicológicos.

4.6. Estudios epidemiológicos

El otro frente de investigación acerca de la influencia de ondas y campos electromagnéticos de baja frecuencia en la salud son los estudios indirectos o epidemiológicos. Estos consisten en el estudio comparado de poblaciones sometidas a distintas dosis de un posible agente causal. Se analiza el efecto beneficioso/pernicioso del agente, comparando el número de individuos afectados en cada población. Estos análisis van acompañados de poderosas herramientas estadísticas y son generalmente realizados en el campo de la Medicina.

La parte fundamental del éxito de este tipo de análisis es la selección de las poblaciones y sus condiciones experimentales. En muchos casos, es posible diseñar las condiciones de control: por ejemplo, en el estudio de nuevos medicamentos o sus efectos secundarios, se establecen al menos dos grupos, cada uno de los cuales contiene una muestra suficientemente diversa de la población (ambos sexos, diversidad de edades, diversidad social, diversidad de antecedentes sanitarios, etc) y a los que se les administra respectivamente el producto bajo control y un placebo. Esta diversificación de ambos grupos es esencial para que podamos asignar la acción del agente al posible efecto observado, sin temor a que alguna diferencia entre ambas poblaciones imponga un sesgo no deseado e incontrolable a los resultados.

En el estudio de la influencia de campos y ondas sobre la salud no es posible acotar las condiciones de control de los grupos, por la razón obvia que nadie quiere exponerse a un agente cuya peligrosidad es precisamente el objeto del estudio. Alternativamente, los investigadores observan la incidencia de determinadas enfermedades en grupos distintos —tanto residenciales como ocupacionales—, caracterizados en principio por diferente exposición a campos/ondas. A partir de las diferencias de incidencia de estas enfermedades, los investigadores procuran encontrar alguna correlación entre ambos hechos.

La dificultad de esta forma de proceder es evidente: es casi imposible aislar la influencia de campos y ondas de muchos otros factores que sí que pueden tener influencia: alimentación, calidad de las aguas, contaminantes atmosféricos, hábitos, materiales de construcción de las viviendas, etc. Con lo cual cualquier correlación se ve muy mediatizada por la incertidumbre en todos estos factores, salvo que aquella sea muy evidente.

4.6.1. Carcinogénesis de los CEM de baja frecuencia

Entre los posibles efectos patógenos de los CEM de baja frecuencia —particularmente, los campos magnéticos CA de frecuencia doméstica 50 Hz producidos por las líneas de transporte eléctrico—, los que más alarma causan son los carcinogénicos. Por eso, la inmensa mayoría de estudios epidemiológicos se centran en una posible correlación entre la incidencia de cáncer y la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia.

En la sección anterior hemos visto los estudios realizados *in vitro* en este sentido. En cuanto a los estudios indirectos se ha buscado una relación entre cáncer y exposición a campos magnéticos de líneas de alta tensión. Existen muchas investigaciones donde no se ha observado correlación alguna. Sin embargo, algunos autores sí han observado una relación con la **leucemia infantil**. En este caso, se han llegado a los resultados que se presentan seguidamente, los cuales no corresponden a un estudio concreto, sino a dos recopilaciones —cada una su correspondiente análisis estadístico— de los datos obtenidos en multitud de estudios previos. Estas dos recopilaciones fueron realizadas por dos grupos independientes en el año 2000 y presentan prácticamente las mismas conclusiones:

- Todas las viviendas analizadas se encontraban en las cercanías de alguna línea de alta tensión. En el 95 % de las viviendas los campos encontrados fueron inferiores a $0,3 \mu\text{T}$.
- Con exposiciones entre $0,3$ y $0,4 \mu\text{T}$ se observa un cierto aumento del número de casos, pero con una incertidumbre muy grande porque el número de casos es mucho más pequeño (5 % de las viviendas, en comparación con el 95 % anterior). En cifras equivalentes a número de casos por 100.000, este aumento correspondería a $8,5 \pm 5$ casos por 100.000.

Es decir, la posible mayor incidencia de leucemia tiene una incertidumbre de casi el 60 %, lo que llevó a los autores a advertir que la asociación observada pudiera ser producto de un artefacto de selección de las muestras.

Sin embargo, en los últimos años se ha publicado una investigación²² que confirma el resultado de la leucemia infantil, relacionando la enfermedad con la distancia de las viviendas a las líneas de alta tensión. En el estudio se expone que niños que viven a una distancia entre 200 m de

²²Draper et al. “*Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case control study*” (2005) <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/cancer-wales.pdf>

las líneas de alta tensión tienen un incremento del riesgo relativo de contraer leucemia del 69 %, mientras que aquellos que viven entre 200 y 600 m tienen un incremento del riesgo del 29 %. Como siempre, estos estudios deben ser tenidos en cuenta, pero todavía necesitan de mayor confirmación empírica.

Una reciente revisión²³ de los resultados hasta el momento sobre la relación entre las CEM de baja frecuencia y la leucemia infantil confirma el patrón sistemático entre ambos eventos. En esta revisión de los artículos sobre el tema publicados hasta el momento, los autores confirman que aparece un incremento de los casos de leucemia para campos mayores que $0,3\mu\text{T}$ o incluso menores. En el artículo se recomienda, por precaución, revisar los límites actuales de la intensidad de los campos a los que está sometida la población. Sin embargo, y como es habitual en los estudios epidemiológicos, puede criticarse ampliamente la metodología empleada debido a que las posibles variables no conocidas pueden equivocar la interpretación de los resultados.

4.6.2. Carcinogénesis de las OEM de la telefonía móvil

En este campo se han publicado en el pasado decenio varios trabajos que han estudiado la incidencia de tumores cerebrales y del *neuroma acústico*²⁴ en usuarios de teléfonos móviles. Es de destacar que estos trabajos se ciñen exclusivamente a la influencia del terminal móvil, descartando por completo la influencia de las antenas fijas, en virtud de lo que ya analizamos en la página 78.

Es decir, en general estas investigaciones concluyen que los datos no muestran una relación causal entre el uso de teléfonos móviles GSM y el desarrollo de los tumores mencionados. Los autores de estos estudios coinciden en señalar que sus conclusiones son parciales debido principalmente a la relativa corta vida de esta tecnología, que impide coleccionar poblaciones que hayan hecho uso de la misma durante un largo periodo; tampoco se tomaron eficientemente datos como la frecuencia y duración de llamadas de los usuarios.

Sin embargo, como hemos dicho, algunos estudios²⁵ han encontrado que el uso prolongado y diario de teléfonos móviles durante un periodo de más de 10 años está relacionado con el aumento del riesgo de sufrir tumores cerebrales, incluyendo neuroma y glioma, especialmente en el lado de uso habitual del teléfono. La potencial relevancia de estos resultados es difícil de evaluar actualmente, ya que aunque la muestra poblacional sea relativamente amplia, la potencia estadística de los datos es pobre. La metodología empleada ha sido muy criticada ya que si se emplean otro tipo de cálculos estadísticos los resultados cambian.

La IARC coordina un estudio epidemiológico que emplea un protocolo único y en el que participan 48 investigadores de 13 países, denominado INTERPHONE cuyos resultados definitivos se hicieron públicos en el año 2010²⁶. Este proyecto comenzó en el año 2000 y en el mismo participaron 14.000 personas que incluyen encuestas sobre los hábitos de consumo de teléfono móvil de 2.708 personas con glioma y 2.409 con meningioma. Este tipo de modelos

²³“*Exposure to electromagnetic fields (non-ionizing radiation) and its relationship with childhood leukemia: A systematic review*” Science of the Total Environment, 408: 16, 3062-3069 (2010)

²⁴Un tipo de tumor benigno

²⁵De 2007, Hardell et al. “*Long-term use of cellular phones and brain tumours-increased risk associated with the use for > 10 years.*” Occup. Environ. Med. (2007)

²⁶“*Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study*”, International Journal of Epidemiology 2010; 39:675-694

caso-control siempre pueden presentar sesgos, pero los autores también han presentado una metodología muy específica para controlarlo. Los resultados finales del proyecto, de nuevo, son “no concluyente” ya que no se observa una relación clara entre el uso del móvil y los casos estudiados.

De nuevo, existen críticas a la metodología empleada por este estudio²⁷. Entre los argumentos esgrimidos se encuentra que el uso de los móviles hoy en día es mucho mayor que hace 10 años, de forma que una estadística a sólo los últimos 10 años no es adecuada. Se reconoce desde el mismo estudio INTERPHONE que el periodo de exposición para todos los sujetos evaluados es demasiado corto como para esperar una posible relación con el cáncer. Es más, ninguno de los cancerígenos actuales (incluido el tabaco) pueden ser identificados como causa de aumento del riesgo cancerígeno en los primeros 10 años. Incluso, y salvo ciertos casos específicos, la radiación ionizante, que se sabe que es causa de tumores cerebrales, no tiene efectos claros entre los 10 a 20 años después de la primera exposición.

Tal vez la primera prueba clara de que no existe relación entre los tumores cerebrales y los móviles venga dado por el estudio recientemente publicado (27 de julio de 2011) en una de las revistas más prestigiosas en la lucha contra el cáncer²⁸. En un editorial anexo a la misma los autores afirman que: “De acuerdo con prácticamente todos los estudios realizados en adultos e expuestos a las ondas de radiofrecuencia, no existen pruebas convincentes de que los niños que usan teléfonos celulares tengan un mayor riesgo de desarrollar un tumor cerebral que los niños que no lo utilizan”. Un muy reciente estudio del Instituto de Salud Pública de Noruega (publicado en septiembre de 2012) descarta que los campos electromagnéticos de baja frecuencia tengan efectos nocivos en humanos²⁹. El comité designado por este Instituto ha revisado la bibliografía científica de los últimos años y ha concluido que no existe ninguna evidencia acerca de efectos nocivos en humanos, aunque recomienda prudencia en el uso de los distintos aparatos (cumplir las normativas vigentes).

En cualquier caso, en la actualidad hay en marcha nuevos experimentos y proyectos para aclarar un poco más los puntos tratados aquí, tanto con experimentos in vitro como empleando estudios epidemiológicos. En este último campo destaca el proyecto MOBI-KIDS³⁰ que fue lanzado en 2009 en 13 países para investigar el posible efecto de las radiofrecuencias en tumores cerebrales en niños. Dado que los tumores cerebrales en niños han aumentado en los últimos años, los organizadores del estudio esperan poder reclutar a 2.000 pacientes para realizar el mismo. Otro proyecto similar es COSMOS³¹, lanzado en Abril de 2010, que pretende estudiar el efecto de los teléfonos móviles mediante el seguimiento a 250.000 personas en 5 países europeos durante 30 años.

4.7. Normativa

En cualquier caso, dada la posibilidad de que los CEM de baja frecuencia tengan algún efecto sobre la salud de las personas, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer

²⁷“*First combined analysis from INTERPHONE Inconclusive*” Environmental Health Perspectives, 118, 7, July 2010.

²⁸“*Mobile Phone Use and Brain Tumors in Children and Adolescents: A Multicenter Case-Control Study*”, JNCI: J Natl Cancer Inst (2011)

²⁹http://www.fhi.no/eway/default.aspx?pid=238&trg=MainLeft_5895&MainArea_5811=5895:0:15,2829:1:0:0:::0:0&MainLeft_5895=5825:99168::1:5896:1:::0:0

³⁰<http://www.mbkds.net>

³¹Cohort Study of Mobile Phone Use and Health (COSMOS) <http://www.ukcosmos.org>

(IARC), perteneciente a la OMS, ha decidido admitir cautelarmente los campos magnéticos de baja frecuencia, así como los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (incluyendo la telefonía móvil) como **posible cancerígeno de tipo 2B**³², cuya descripción es:

Corresponden al tipo 2B los agentes cuya evidencia cancerígena es limitada en humanos —se ha observado una correlación positiva, pero no pueden descartarse el azar, sesgos o factores de confusión— y limitada o inadecuada en animales.

En el grupo 2B se encuentran otros 283³³ agentes, entre ellos el café.

Conviene aquí mencionar que un producto habitualmente empleado por la población, como son las lámparas de bronceado hasta hace poco han sido declaradas por la IARC como “probable cancerígeno para humanos” (tipo 2A). Sin embargo, una reciente actualización a elevado a estas lámparas al grupo 1, directamente cancerígeno, como lo son el tabaco o la radiación solar, entre otros muchos.

En definitiva, la normativa actual considera que la exposición a CEM y OEM no tiene efectos acumulativos, al contrario que las radiaciones ionizantes. Dicho en otras palabras, el posible daño depende de la potencia absorbida en cada momento, no de la energía total. Los efectos comprobados como perjudiciales para los humanos son los efectos térmicos superiores a un SAR de $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Por tanto, los efectos subtérmicos están explícitamente excluidos de valoración, salvo aquellos documentados en la tabla 4.1 que, además, afectan sólo a campos DC o de muy baja frecuencia.

Frecuencia, f	B	J	SAR(1)	SAR(2)	SAR(3)	S
0 Hz	40					
0 - 1 Hz		8				
1 - 4 Hz		$8 f^{-1}$				
4 - 100 Hz		2				
100 Hz - 100 kHz		$2 \cdot 10^{-3} f$				
100 kHz - 10 MHz		$2 \cdot 10^{-3} f$	0,08	2	4	
10 MHz - 10 GHz			0,08	2	4	
10 - 300 GHz						10

Tabla 4.2: Restricciones básicas en términos de campo magnético, B [mT], densidad de corriente J [$\text{mA} \cdot \text{m}^{-2}$], intensidad de OEM S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] (todos ellos valores RMS) y SAR [$\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$] según RD 1066/2001. (1) SAR de cuerpo entero. (2) SAR localizado (cabeza y tronco). (3) SAR localizado (miembros). En cada fila, la frecuencia f se tiene que introducir en hercios.

Los límites de exposición aceptados hoy en día se basan principalmente en una recomendación del año 1998 del ICNIRP (acrónimo inglés que equivale en español a *Comisión Internacional para la Protección ante Radiaciones No Ionizantes*). En esta recomendación se fijan las restricciones básicas (en términos de SAR o J) y límites derivados (E , B , S), y se toma como tiempo promedio para las medidas 6 minutos. Esta recomendación incluye un factor de seguridad de 10 (10% de la restricción básica) para exposiciones agudas (cortas) en **ambientes**

³²Informe del 31 de mayo de 2011: http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2011/pdfs/pr208_E.pdf; la inclusión de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia en esta categoría tuvo lugar en 2013.

³³Datos tomados de IARC <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>, actualizado a 30 de septiembre de 2014

ocupacionales, así como un factor de seguridad de 50 (2% de la restricción básica) para exposiciones al público en general o en **ambientes residenciales**.

Esta recomendación del ICNIRP ha dado lugar a una legislación variada tanto a nivel nacional como a nivel europeo. En estos momentos está vigente en España el Real Decreto 1066/2001, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.

El RD español es más exigente que las restricciones básicas del ICNIRP- En las tablas 4.2 y 4.3 publicamos respectivamente las restricciones básicas y los llamados “niveles de referencia” del RD 1066/2001.

Frecuencia, f	E [$V \cdot m^{-1}$]	B [μT]	S [$W \cdot m^{-2}$]
0 - 1 Hz		400	
1 - 8 Hz	10^4	$400 f^{-2}$	
8 - 25 Hz	10^4	$5000 f^{-1}$	
0,025 - 0,8 kHz	$250 f^{-1}$	$5 f^{-1}$	
0,8 - 3 kHz	$250 f^{-1}$	6,25	
3 - 150 kHz	87	6,25	
0,15 - 1 MHz	87	$0,92 f^{-1}$	
1 - 10 MHz	$87 f^{-1/2}$	$0,92 f^{-1}$	
10 - 400 MHz	28	0,092	2
400 - 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$4,6 \cdot 10^{-3} f^{1/2}$	$5 \cdot 10^{-3} f$
2 - 300 GHz	61	0,20	10

Tabla 4.3: Niveles de referencia para campos eléctricos y magnéticos, e intensidades de OEM. Valores RMS imperturbados, según RD 1066/2001. En cada fila, la frecuencia f se tiene que introducir en las unidades de la 1ª columna.

En este decreto se establece que los Servicios Técnicos del MITyC elaborarán planes de inspección para comprobar que las estaciones emisoras y, entre ellas, las estaciones base de telefonía móvil, cumplen lo establecido en el Reglamento. Por ejemplo, en el informe publicado en 2008, que corresponde a las actuaciones llevadas a cabo en 2007, se informa de que las antenas de telefonía móvil instaladas en España son muy débiles, en magnitudes de centenas o miles de veces inferiores a los valores de referencia en las bandas UMTS ($955 \mu W/cm^2$) y GSM ($450 \mu W/cm^2$)

El Real Decreto 1066/2001 además establece que habría que minimizar la exposición en los llamadas zonas, áreas o lugares sensibles, que son aquellos que por su naturaleza se considera que existen una mayor percepción del riesgo en la exposición. Entre los lugares sensibles se encuentran guarderías, centros de educación infantil, centros de saludo, hospitales, parques públicos, etc. En el informe del MICyT de 2007, se proporcionan unos resultados que oscilan entre un máximo de $2,320 \mu W/cm^2$ en Madrid y un mínimo de $0,024 \mu W/cm^2$ en Melilla. La media del nivel nacional en 2007 es de $0,452 \mu W/cm^2$. Dado que el nivel de referencia es de $450 \mu W/cm^2$ para la frecuencia de 900 MHz, vemos que las mediciones muestran que las exposición a la que está sometida la población es muy baja.

En el contexto europeo, se publica en el año 2004 la Directiva 2004/40/CE del Parlamento y Consejo Europeos, de 29 de abril sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas

a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los campos electromagnéticos, que responde a las recomendaciones del ICNIRP de 1998. Estas recomendaciones son menos estrictas los “niveles de referencia” del RD 1066/2001.

4.8. Conclusiones

- Los efectos sobre los organismos de los campos electromagnéticos de baja frecuencia NO son acumulativos, lo que los diferencia de manera esencial de los producidos por las radiaciones ionizantes.
- La potencia absorbida por la materia se transforma dentro de ésta en calor. Para el caso del ser humano y otros mamíferos, este calor puede suponer un aumento de temperatura si la potencia absorbida es superior a la tasa de disipación natural del cuerpo ($\sim 4 \text{ W/kg}$ en humanos).
- Los actuales conocimientos de la física de la materia viva, y el conjunto de la evidencia científica disponible, no han aportado pruebas claramente consistentes de la existencia de peligros para la población general, derivados de exposiciones a campos de potencias o intensidades débiles, propias de ambientes residenciales u ocupacionales típicos. Sin embargo, existen estudios científicos que relacionan ciertos casos (leucemia infantil) con las líneas de alta tensión. En cuanto a los resultados *in vitro*, donde se estudia la influencia de las OEM de baja frecuencia en el tejido biológico, existe una clara discrepancia en la comunidad científica, no existiendo un acuerdo debido a la variedad de estudios y a la falta de conocimiento de los mecanismos biofísicos.
- De forma cautelara, la IARC ha asignado a los campos de baja frecuencia un poder cancerígeno similar al del café.

Autoevaluación

1. Según los estudios realizados hasta la fecha, los campos magnéticos de baja frecuencia producidos por líneas de alta tensión presentan una correlación incierta con la siguiente enfermedad:
 - a) El cáncer infantil, en general.
 - b) El cáncer, en general, y a todas las edades.
 - c) La leucemia infantil.
 - d) La leucemia a todas las edades.
2. Supongamos que el ruido del campo eléctrico para una célula con una membrana de tamaño $d=5 \text{ nm}$ es $E_{kT} = 2600 \text{ V/m}$ ¿cual sería el valor del ruido eléctrico si consideramos que el tamaño de la membrana es $7,5 \text{ nm}$?
 - a) 2600 V/m .
 - b) $1415,2 \text{ V/m}$
 - c) 4784 V/m

d) 3407 V/m

Soluciones:

1. Respuesta C.

2. La variación del ruido eléctrico con el tamaño es $E \sim d^{-3/2}$. Por tanto, $E_1/E_2 = (d_1/d_2)^{-3/2} = (5/7,5)^{-3/2} = 1,84$ y $E_2 = 0,544 \times 2600 = 1415,2$ V/m. (Respuesta B).

