

---

# EFECTOS NEUROLÓGICOS POR TELÉFONOS CELULARES: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y MODELOS MATEMÁTICOS


ERNESTO PONCE LÓPEZ, DANIEL PONCE SALDÍAS y  
MAX ANDRESEN HERNÁNDEZ

---

## RESUMEN

La radiación electromagnética emitida por la telefonía móvil y las antenas bases puede penetrar en los tejidos de la cabeza humana, pudiendo ser absorbida y transformada en calor. Debido al incremento de la telefonía móvil hay interés en estudiar sus efectos en la salud humana. Se analizó la literatura médica desde 1996 hasta 2013, mediante búsquedas en Internet utilizando Medline y PubMed. Usando modelos matemáticos se estudió los efectos para frecuencias de 0,9GHz. Se empleó el modelo de diferencias finitas para predecir relaciones de absorción específica en  $W\cdot m^{-2}$ . El modelo de elementos finitos se basó en un corte horizontal de la cabeza de niños de 10 años, a la altura de los ojos. Se utilizó un análisis en dos dimensiones y un espesor mínimo. El modelo de diferencias predijo relaciones de

absorción específica, alcanzando de  $0,72W\cdot m^{-2}$ , siendo 2,0 lo admitido por la Unión Europea. Los cálculos de absorción obtenidos de las predicciones por elementos finitos (para determinar el desplazamiento del campo eléctrico) indicaron una mayor coincidencia para la versión de 2009 ( $0,685W\cdot m^{-2}$ ). La nueva versión 2014 alcanzó un máximo de  $0,636W\cdot m^{-2}$ , pero tiene ligeras diferencias entre la 2ª y 3ª subdivisión del hemisferio cerebral. Sin embargo, esta versión más moderna del software de elementos finitos tiene una buena coincidencia con los resultados obtenidos por otros autores. Las modernas herramientas computacionales permiten modelar el efecto de los fonos celulares en el cerebro, existiendo algunas diferencias menores entre las predicciones de los diferentes programas.

 Desde hace más de una década diversos estudios indican que la radiación electromagnética emitida por la telefonía móvil y desde antenas bases penetra en la cabeza, pudiendo ser absorbida por el cerebro y transformada en calor. En el caso de los niños es más crítico, por la mayor cantidad de agua que contiene sus tejidos. Puede acumularse energía en un tiempo corto y si el cerebro es perturbado por ondas electromagnéticas, pueden producirse efectos fisiológicos. Según la literatura

analizada pueden generarse cambios en la barrera hematoencefálica, en el metabolismo celular y en funciones neurotransmisoras, entre otros. Habría también efectos no térmicos y otros producidos por campos magnéticos de baja frecuencia provenientes de la batería del teléfono. Dentro de las secuelas neurológicas y fisiológicas analizadas estarían: tumores, afecciones cognitivas, hipersensibilidad electromagnética, genotoxicidad, alteraciones del sueño, del sistema inmunológico y del ADN. El riesgo de tumores cancerosos en el

cerebro es un tema muy discutido, cuyos recientes estudios revelarían su ocurrencia a largo plazo, clasificándose como posiblemente carcinógenos a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia. Existe un uso masivo de estos artefactos, desde niños hasta adultos mayores. Por este motivo se ha legislado para proteger a la población, midiendo la tasa de radiación absorbida por la cabeza humana, mediante el SAR (*specific absorption rate*). En EEUU se ha establecido un límite de  $1,6W\cdot kg^{-1}$  promediado sobre 1g de tejido.

---

**PALABRAS CLAVE /** Polución Electromagnética / Telefonía Móvil / Tumores Cerebrales /

Recibido: 21/01/2014. Modificado: 17/11/2014. Aceptado: 19/11/2014.

**Ernesto Ponce López.** Ingeniero Civil Mecánico, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. M.Sc. en Ciencias Ambientales, Universidad de Tarapacá (UTA), Chile. Doctor Ingeniero Industrial, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España. Ph.D. en Ciencias del Medio Ambiente (Programa UPM-UTA). Profesor-Investigador, UTA, Chile. Dirección: Escuela Ingeniería Mecánica, UTA. 18 de Septiembre 2222, Arica, Chile. e-mail: eponce@uta.cl

**Daniel Ponce Saldías.** Ingeniero Civil Mecánico, UTA, Chile. M.Sc. y Ph.D. en Mecatrónica, y Post doctorando, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

**Max Andresen Hernández.** Médico Cirujano, Universidad de Chile. M.Sc. en Cuidados Intensivos, Université Catholique de Louvain, Bélgica. Director, Departamento de Medicina Intensiva, Hospital Clínico, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

---

En la Unión Europea el máximo se acepta en  $2\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$  sobre 10g de tejido (SAR, 2013). Se ha reportado en el mundo unos  $500\times 10^6$  usuarios de móviles por la Agencia Internacional de Estudios sobre Cáncer (IARC, 2011) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011a) por lo que se ha generado preocupación por los efectos de la radiación electromagnética en el rango de micro ondas.

## Materiales y Métodos

Para la información general (parte 1) se ha revisado la literatura médica desde 1996 hasta 2013, mediante búsquedas en Internet utilizando las bibliotecas Medline y PubMed, junto con datos obtenidos de organizaciones oficiales. Las publicaciones consideradas pertinentes fueron ordenadas y analizadas.

En relación a los modelos matemáticos analizados (parte 2) se llevo a cabo el estudio para frecuencias electromagnéticas de 0.9 GHz (actualmente una de las más bajas). Se empleó el modelo de diferencias finitas para predecir relaciones de absorción específica en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  (coeficiente SAR, de *specific absorption rate*). Se usaron imágenes de resonancia magnética (MRI, de *magnetic resonance imaging*) en cortes transversales del cerebro en dos dimensiones. El programa utilizado fue MATLAB. Los datos de las características de los tejidos de la cabeza fueron obtenidos de Torres (2003).

El modelo de elementos finitos se basó en un corte horizontal de la cabeza a la altura de los ojos de un niño de 10 años, obtenido de la superposición de una imagen MRI. Se realizó un análisis en dos dimensiones utilizando el programa ALGOR (*actual AUTODESK simulation*), para aplicaciones electromagnéticas.

## Efectos físicos

### *Efectos térmicos*

Es conocido el calentamiento dieléctrico en los tejidos biológicos por la radiación electromagnética de micro ondas, que genera rotaciones en las moléculas polares. En estos tejidos hay cargas libres que pueden moverse, por efecto de un campo magnético externo. Las moléculas, con sus cargas positivas y negativas, pueden separarse por acción del campo; en otras palabras, se polarizan (Torres, 2003). A frecuencias de 0,9GHz, en los tejidos con alto contenido graso, con 10% de agua, el coeficiente dieléctrico es 4, en cambio con 50% de agua es 12 (Gabriel y Gabriel, 1996). Estarían

más expuestos los niños por tener un mayor contenido de agua en su cerebro, respecto al de un adulto y los posibles efectos han sido considerados como un problema de salud pública (Wake *et al.*, 2009; Sage y Carpenter, 2009). En el cerebro, la circulación sanguínea puede disipar el exceso de temperatura generado, pero en la córnea ocular no hay esta regulación térmica. Se ha detectado la presencia de cataratas en estudios hechos en conejos expuestos a valores de SAR de 100 a  $140\text{W}\cdot\text{kg}^{-2}$ , pero en monos sometidos a igual exposición no se detectó tal efecto (ICNIRP, 1998).

### *Efectos no térmicos*

Los efectos no térmicos se producen a largo plazo. Son efectos bioquímicos y electro-físicos originados por las ondas electromagnéticas, que pueden actuar sobre el sistema cardiovascular; sistema nervioso central; sistema inmunológico; metabolismo, y afectarían factores hereditarios (Salford *et al.*, 2003; De Iuliis *et al.*, 2009). Se ha observado efectos fisiológicos sin que intervenga un aumento importante de la temperatura (Glaser, 2005). Las investigaciones no han tenido una buena validación, debido a las diferentes técnicas empleadas. Las señales del carrier empleadas en las comunicaciones de protocolo, en celulares, a menudo resultan en emisiones de baja frecuencia y dichas emisiones tienen una implicación fisiológica (Foster *et al.*, 2004). Se ha argumentado que el efecto no-térmico se puede interpretar como una respuesta natural de las células del organismo al incremento de temperatura. Al existir efectos termosensibles en las células, ellas inician una secuencia de segundos y terceros sistemas de mensajes que generan proteínas de choque calórico, para defender las células contra el metabolismo de stress celular causado por el calor (Glaser, 2005). Los aumentos de temperatura que originan esos cambios son muy pequeños para ser detectados por los equipos convencionales (Glaser, 2005).

### *Efectos en la barrera hematoencefálica*

Existe una barrera funcional y permeable entre los conductos vasculares y el tejido nervioso, que ajusta el paso de fluidos hacia el interior y exterior del cerebro. Cuando existe radiación de radiofrecuencia se pueden generar efectos fisiológicos importantes. Se pueden producir alteraciones de la permeabilidad de la barrera sangre-cerebro, en el control del flujo de Ca y en la producción de la enzima ornitina

decarboxilasa (OD), siendo la función de la barrera muy importante en las actividades cerebrales (Foster y Repacholi, 2004). Paradojalmente, al no existir evidencia para reducir los niveles máximos de SAR establecidos para efectos térmicos, siguen produciéndose efectos no-térmicos. Algunos investigadores han estudiado los efectos de microondas en cerebros de ratas, encontrando pérdida de albúmina en el cerebro debido a la permeabilidad de la barrera hematoencefálica (Salford *et al.*, 2008). Se confirman así las investigaciones de otro grupo (Frey, 1998). Otros investigadores (Franke *et al.*, 2005) no han confirmado esos resultados en estudios de células *in vitro*. Tampoco fue confirmado por otros grupos (Kuribayashi *et al.*, 2005) en sus estudios sobre ratas nuevas y juveniles.

### *Efecto de la chiralidad*

Conocido también como giro, el efecto de la chiralidad es una propiedad geométrica normal en la naturaleza. La tienen desde micro algas como la Spirulina hasta la molécula de ADN, ambas de forma de espiral. A nivel molecular se encuentra en sustancias orgánicas e inorgánicas. Está en moléculas esenciales para el desarrollo de la vida, como proteínas que tienen aminoácidos con giro *sinistrorsum*. Los almidones, ácidos nucleicos, glicógeno, contienen azúcares con rotación de acuerdo a la rotación *dextrorsum*. La molécula de ADN tiene una doble espiral en sentido *dextrorsum*. Las ondas electromagnéticas también poseen rotación. Considerando que el tejido del cerebro tendría materiales con giro en ambos sentidos, es importante el efecto que se produce en la absorción de la onda. Si se genera un campo magnético como el producido por la batería del teléfono y ese campo actúa sobre el tejido cerebral, puede aumentar el efecto de chiralidad-magnética (Lakhtakia *et al.*, 1998). Las microondas de los celulares, inducen un campo eléctrico en el tejido neuronal, el que reaccionaría según el sentido de giro de este último (Torres, 2005).

## Secuelas Neurológicas y Epidemiológicas

### *Cáncer*

Un trabajo muy discutido (Schüz *et al.*, 2006) fue realizado sobre una población de 420000 daneses, suscriptores por 10 o más años de telefonía móvil. Se concluyó que no había evidencia para asociar el riesgo de adquirir tumores cancerígenos y el empleo de celulares. La Oficina Federal para la Protección de Radiación de Alemania

rechazó ese trabajo por hallarlo inconcluso (OFPR, 2007). El proyecto multinacional INTERPHONE (IARC, 2011), referido a 13 países, estudió los casos de glioma (tumor de células gliales del cerebro o la médula espinal) y meningioma (tumor usualmente benigno de tejido aracnoideo de las meninges que se adhiere a la duramadre) y determinó que no habría una conexión sólida entre tumores cerebrales y telefonía móvil, siendo necesarias mayores investigaciones para una conclusión definitiva. La Agencia Internacional para Investigación del Cáncer (IARC, 2011) indicó que el riesgo de cáncer cerebral no se había establecido a partir de los datos de INTERPHONE, y que observaciones en personas jóvenes ameritaban mayores investigaciones. Se había determinado que aunque no se observara en los usuarios riesgo de glioma o meningioma, se necesitaban estudios a largo plazo para confirmar conclusiones (Schüz *et al.*, 2006).

También se analizó la ocurrencia de los neuromas del nervio acústico, un tumor cerebral benigno, concluyendo que no habría riesgo concreto de esta enfermedad durante la primera década después de empezar a usar el celular, pero no podía descartarse el riesgo después de un período de mayor plazo (Schoemaker *et al.*, 2005). Se analizaron las exposiciones a RF de teléfonos celulares, indicando que en las áreas de mayor absorción de radiaciones habría mayor riesgo de tumores (Cardis *et al.*, 2008). Se caracterizó la distribución espacial en el cerebro de la energía de RF: entre 97 y 99% de la energía aparecía absorbida en el hemisferio del lado donde se usa el teléfono, sobre todo (50-60%) en el lóbulo temporal (Cardis *et al.*, 2011).

Hardell *et al.* (2007) analizaron el riesgo de tumores cerebrales cancerosos tras más de diez años de uso de celulares, encontrando que hubo un incremento en el riesgo de gliomas malignos; hubo una conexión entre el empleo de celulares y el riesgo de neuromas acústicos; los tumores comúnmente ocurren en el lado de la cabeza donde se usa el celular y una hora de uso de celular al día incrementa el riesgo de tumor después de 10 o más años. Posteriormente (Hardell *et al.* (2009) se confirmó el estudio anterior, estableciendo que el uso de celulares antes de la edad de 20 años, incrementa el riesgo de tumores en 5,2 veces comparado con 1,4 veces para otras edades, y concluyendo que a largo plazo el empleo normal de celulares no es seguro. Otro estudio sugiere que el uso por más de una década de celulares se asocia al incremento de riesgo de neuroma

acústico benigno (Lönn *et al.*, 2004). En mayo 2011 la Agencia Internacional para Investigación del Cáncer (IARC, 2011) clasificó como posiblemente carcinógenos a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia, basándose en el trabajo actualizado de Interphone (Schüz, 2006).

### *Secuelas cognitivas*

Un estudio sobre el efecto de celulares en niños fue publicado (Krause *et al.*, 2006) y luego se estudió cómo afectaba el proceso cognitivo la radiación en pulsos o radiación continua de celulares, bajo ondas 0,902GHz de frecuencia (Krause *et al.*, 2009 y Gandhi *et al.*, 2011). También se analizaron los efectos de la radiación emitida por celulares sobre las funciones cognitivas en adultos y se confirmó una respuesta más lenta en trabajos de memorización, ante exposiciones a radio frecuencia sobre la cabeza; a mayor tiempo de exposición, mayores eran los efectos (Luria *et al.*, 2009).

### *Hipersensibilidad electromagnética*

En investigaciones sobre exposiciones a campos electromagnéticos de radiofrecuencia, asociadas a síntomas de enfermedad, se ha reportado en algunos usuarios de celulares efectos de salud durante y después de su uso (Röösli, 2008): mareos, dolores de cabeza, sensaciones de ardor, hormigueo en la piel de la cabeza y extremidades, perturbaciones del sueño, cansancio, pérdida de capacidad atencional, disminución del tiempo para reaccionar, pérdida de retención mnemónica, problemas en el sistema digestivo, taquicardia, y malestar general, entre otros. Estos síntomas coinciden con los del stress y no deberían separarse de sus efectos nocivos (Röösli, 2008).

### *Efectos sobre el flujo de iones en células nerviosas y el ADN*

El flujo de iones a través de las membranas celulares se ve afectado y se alteran las actividades de las células nerviosas, que funcionan con iones de Na y Ca, en el tejido cerebral. También, con alteraciones del flujo iónico se pueden producir trastornos en la síntesis del ADN y cambios en las respuestas de conjuntos celulares ante moléculas señalizantes. Pueden generarse, además, efectos sobre las hormonas del crecimiento y neurotransmisoras (Röösli, 2008). Se han reportado análisis sobre espermatozoides humanos sometidos a radiaciones de 1,8Mhz y SAR de 0,4 a 27,5W·kg<sup>-1</sup>. Al incrementar el índice de

absorción decrecía la movilidad y vitalidad de los espermios, produciéndose una fragmentación del ADN (Röösli, 2008). Un análisis de publicaciones sobre genotoxicidad por radiofrecuencia reportó 49 casos positivos frente a 42 negativos, encontrando amplia evidencia de que se puede alterar el material genético de células *in vivo* e *in vitro* (Ruediger, 2009). Se describió una reducción en la capacidad reproductiva de la mosca de la fruta por exposición a RF de celulares, desde 0,9 a 1,8GHz, sugiriéndose que hubo fragmentación en las moléculas de ADN, induciendo muerte celular (Panagopoulos *et al.*, 2007).

### *Antenas transmisoras de telefonía celular*

Las emisiones de las antenas son continuas y de mayor potencia a corta distancia, decayendo con el cuadrado de la distancia. Se han reportado síntomas en personas que viven cerca de estas antenas (Abdel-Rassoul *et al.*, 2007). Expertos de la Agencia Francesa de Seguridad Sanitaria y Medio Ambiente (AFSSET, 2005; Informe SATI, 2012) recomendaron en 2005 una distancia no menor de 100m entre las antenas y las viviendas.

### **Otras secuelas**

*Sobre el sueño.* Se han estudiado estos efectos por más de una década. La mayoría de los trabajos indicaba que había alguna alteración, y las investigaciones más recientes confirman que hay una relación significativa entre las alteraciones del sueño y los celulares (Hung *et al.*, 2007).

*Sobre abortos.* Desde hace más de una década han sido asociados riesgos de abortos con la polución electromagnética. Se han presentado casos en el control de campos electromagnéticos en residencias, donde han reportado abortos (Lee *et al.*, 2002).

*Sobre tiempo de reacción de conductores de vehículos.* Se altera el tiempo de reacción de conductores por uso de celulares, incrementando el riesgo de accidente por conducir y hablar por un teléfono móvil cerca de la cabeza. Se ha demostrado que el tiempo en reaccionar fue en promedio 30% más lento al usar un celular, comparado con conductores legalmente bebidos (Europa: 0,8g de alcohol) y casi un 50% más lento que el de un conductor en estado normal (OMS, 2011b). Otro estudio, sobre 20 voluntarios en EEUU, concluye en 2003 que aun con el sistema de manos libres los conductores sufren una alteración en lo que ven y en lo que perciben de la realidad: "tienen una especie de visión de túnel que los expone a sí mismos



en situación riesgosa así como a los demás, cuadruplicando el riesgo de accidentes” (Drews *et al.*, 2008).

### Recomendaciones para Reducir la Exposición a la Energía de Radiofrecuencia

En EEUU la FDA (*Food and Drug Administration*) y la FCC (*Federal Communications Commission*) han sugerido reservar el uso de celulares para conversaciones cortas o solo cuando no hay teléfonos convencionales, y usar el sistema ‘manos libres’. En Australia, la ARPANSA (*Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*) recomienda reducir los tiempos de llamadas sobre todo los niños, hacer llamadas sólo cuando la recepción es buena, usar manos libres, hablar a mayor distancia del celular o por mensajes de texto. En Rusia el RNCNIRP, basado en la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2007), aconseja que no usen teléfonos móviles los niños de menos de 16 años, las mujeres embarazadas y quienes padecen enfermedades neurológicas, que la duración de las llamadas sea limitada a 3min, y después de hacer una llamada el usuario debería esperar 15min antes de realizar otra; se recomienda el uso de auriculares y manos libres, y usar mensajes de texto.

### Modelos Matemáticos

El campo eléctrico  $E$  tiene unidades en volts/metro ( $V \cdot m^{-1}$ ) y el campo magnético  $H$  en amperes/metro ( $A \cdot m^{-1}$ ). La relación entre ambos es la impedancia  $Z$ :

$|E/H| = Z = (\mu/\epsilon)^{1/2}$  en ohms, que es válida para un campo lejano y donde  $\mu$ : permeabilidad magnética en Henry/metro ( $H \cdot m^{-1}$ ), y  $\epsilon$ : permitividad eléctrica en Faraday/metro ( $F \cdot m^{-1}$ ).

En el caso de campos cercanos dicha relación no se cumple porque depende de la conductividad  $J = \sigma \cdot E$  y entonces  $E/H = f(E, H, \sigma)$ , donde aparece  $\sigma$  como nueva variable, la conductividad del tejido biológico.

La tasa de absorción específica SAR (*specific absorption rate*) es la cantidad de energía absorbida por una masa de tejido contenida en un volumen

determinado. Su valor dependerá de la energía de la onda electromagnética y del tipo y cantidad del tejido expuesto.

$$SAR = (\sigma/2 \rho) |E|^2 \text{ en } W \cdot kg^{-1}$$

donde  $\sigma$ : conductividad del tejido ( $S \cdot m^{-1}$ ),  $\rho$ : densidad del tejido ( $kg \cdot m^{-3}$ ), y  $E$ : valor máximo del campo eléctrico.

Por otra parte  $SAR = C(dT/dt)$ , donde  $C$ : calor específico del tejido ( $J \cdot kg^{-1}$ ), y  $dT/dt$ : diferencial de temperatura respecto al tiempo.

La estimación de la energía de radiofrecuencia (RF) absorbida en el cerebro desde teléfonos celulares es calculada por un algoritmo (Cardis, 2011). Se calcula la dosis de energía específica acumulada (*cumulative specific energy, CSE*), en joules absorbidos/kg.

El efecto de chiralidad o espiral de la onda electromagnética puede insertarse en las ecuaciones del modelo matemático mediante las ecuaciones de Feodorov:

$$D = \epsilon (E + \beta \nabla \times E); B = \mu (H + \beta \nabla \times H); \omega = 2\pi f$$

donde  $D$ : densidad de flujo eléctrico en coulomb/m,  $\beta$ : pseudo-escalar que cuantifica la chiralidad o giro de la onda,  $B$ : densidad de flujo magnético en weber/m<sup>2</sup>, y  $\nabla$ : rotacional, el operador vectorial.

### Diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)

Con este método se inició el estudio de los efectos electromagnéticos en el cerebro a partir de la década de los 80. A grandes rasgos consiste en crear una grilla rectangular y uniforme, donde existen condiciones de contorno en el medio externo (barrera de aire). La fuente de emisión del celular se modela como emisor puntual en el borde de la grilla. Los datos de entrada son las características físicas y electromagnéticas de un medio isotrópico (cabeza humana): la frecuencia de emisión, la potencia de entrada, la impedancia, permitividad y efecto rotacional de la onda, entre otros datos físicos. Las respuestas pueden ser desde gráficas del SAR respecto a campos

magnéticos hasta imágenes de los efectos de las microondas en la cabeza. Algunos datos usados en los modelos se indican en la Tabla I.

Se realizan cortes horizontales de un determinado espesor en una imagen de resonancia magnética de una cabeza humana (MRI, de *magnetic resonance imaging*), Figuras 1 y 2. Estas capas se numeran desde la base del cráneo. El corte se divide en una grilla de 8x8 rectángulos o celdas. En el lado del oído se aplican las ecuaciones de un campo electromagnético de las características de un teléfono móvil. El campo atraviesa los tejidos de la cabeza como un frente de onda (Figura 3). Uniendo los distintos cortes se logra el efecto tridimensional.



Figura 1. Los tejidos se identifican en un corte horizontal.

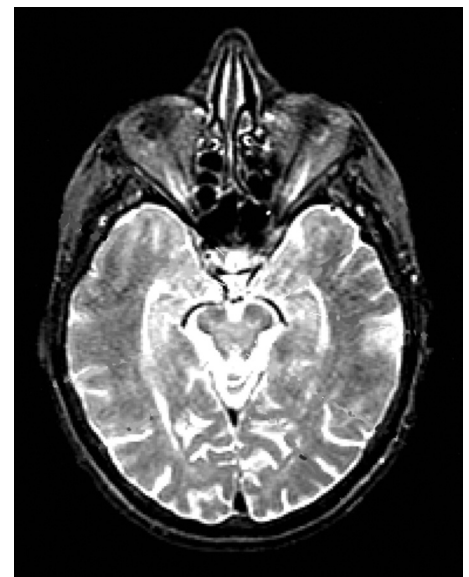


Figura 2. Capa número 30 contada desde la base del cerebro.

TABLA I  
PARÁMETROS DEL MODELO PARA CABEZA DE NIÑO

Material	Unidades	Aire	Piel	Cráneo	Cerebro	Sangre
Conductividad ( $\sigma$ )	$S \cdot m^{-1}$	0	0,63	0,04	1,46	1,26
Permitividad ( $\epsilon$ )	$F \cdot m^{-1}$	1	23	5,4	51	59
Densidad de tejidos ( $\rho$ )	$kg \cdot m^{-3}$	-	1060	1400	1050	1020

Fuente emisora: potencia de entrada 2,65W, impedancia= 100ohm; frecuencia= 900MHz. Datos de Torres (2003).

Resultados obtenidos por diferencias finitas

Al simular absorciones en un valor de  $B_0\omega_0=1e-5$  (densidad de flujo magnético por frecuencia) se obtuvo el SAR. El modelo permitió predecir relaciones de absorción específica, alcanzando  $0,72W\cdot m^{-2}$  en la zona correspondiente a la entrada, 0,03 en el cuerpo calloso y 0,02 en la entrada al hemisferio contiguo (Figura 3). Lo admitido por la Unión Europea es  $2.0 W\cdot kg^{-1}$  promediada sobre 1g de tejido (SAR, 2013).

Método de los elementos finitos (MEF)

Este método subdivide un volumen de material continuo en muchos elementos, que conformarían un conjunto. A cada elemento se puede dar características físicas propias, como densidad,

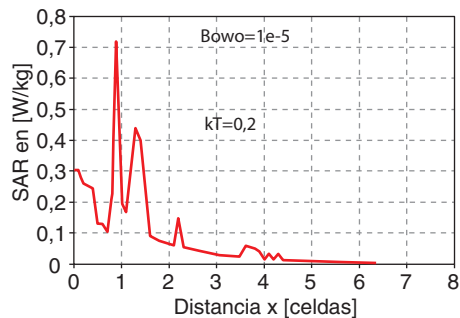


Figura 3. SAR, para la capa número 30, hacia el interior de cabeza de niño de 10 años; los parámetros Bowo (Bo corresponde a la batería del teléfono y  $\omega_0$  a la frecuencia) y kT (efecto de chiralidad) son constantes. Diferencias finitas. La incidencia de la onda se tomó como normal y se consideró linealmente polarizada.

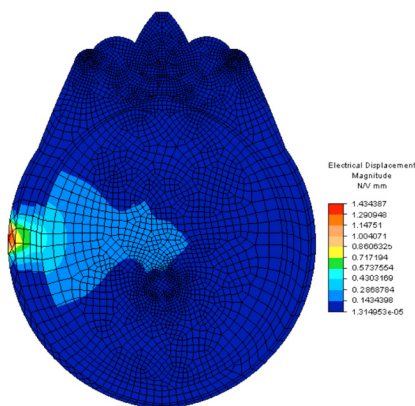


Figura 4. Desplazamiento del campo eléctrico en la cabeza: penetración del campo de un teléfono celular, en D en N/Vmm. Elementos finitos 2D. Cabeza de niño de 10 años. Incidencia normal. Polarización lineal en la entrada. Potencia 2,65W. Programa MEF de ALGOR versión 2009.

permeabilidad, impedancia, conductividad, permitividad, entre otros. En las ecuaciones constitutivas se puede incluir el efecto de chiralidad o de espiral, siempre que sea un programa abierto. Al aplicarle ondas electromagnéticas externas al conjunto, estas son transmitidas al interior, su efecto puede recogerse como SAR, campos eléctricos e imágenes, por mencionar algunos. Los datos de la simulación serían para cada versión empleada aproximadamente: 817 elementos cuadriláteros tipo 2D, 2299 nodos, lado de la malla de 0,3mm y material isotrópico de 1mm de espesor.

La Figura 4 ilustra el efecto de una onda, visualizada como penetración del campo eléctrico en la cabeza humana. Imagen bidimensional en un corte horizontal a la altura de los ojos, empleando el programa de MEF ALGOR versión 2009. La Figura 5 es similar, pero en la versión 2014 de Autodesk Simulation Mechanical. Los resultados aparecen como vector de desplazamiento eléctrico, en N/Vmm o  $As\cdot m^{-2}$ .

Resultados por MEF y Discusión

En este estudio el MEF se hizo con programas comerciales cerrados, que no están programados para calcular el SAR, sino que calculan el desplazamiento del campo eléctrico. El SAR calculado en base a esta información está en la Figura 5 (versión 2009). Tomando como línea de referencia el borde de la cabeza donde entran las ondas y subdividiendo cada hemisferio cerebral en cuatro franjas paralelas, resultó:  $0,685W\cdot kg^{-1}$  en la entrada de las ondas al cerebro, a distancia de 0,8 celdas del borde;  $0,476W\cdot kg^{-1}$  a distancia de 1,5 celdas;  $0,305$  a 1,8 celdas;

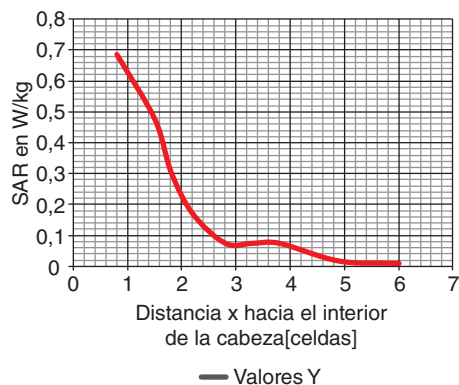


Figura 5. SAR para cabeza de niño de 10 años. Capa número 30. Obtenido por elementos finitos 2D. Se descarta el SAR en el cuero cabelludo, cráneo y fluido céfaloraquídeo, dejando sólo el efecto en el cerebro. La incidencia de la onda se tomó como normal y se consideró linealmente polarizada. Programa ALGOR versión 2009.

0,170 a 2,3 celdas;  $0,075W\cdot kg^{-1}$  desde 2,8 a 3,8 celdas; y  $0,0175W\cdot kg^{-1}$  en el cuerpo calloso y una porción del hemisferio vecino (de 4,8 a 6 celdas). Para la versión 2009 habría una diferencia máxima de 4,8% entre diferencias finitas y elementos finitos.

La versión empleada del MEF de 2014 (Figura 7) entrega los resultados siguientes:  $0,636W\cdot kg^{-1}$  a distancia de 0,9 celdas;  $0,309$  a 1,1 celdas;  $0,172$  de 2 hasta 3,3 celdas;  $0,076$  a 3,5 celdas;  $0,026$  a 4 celdas; y  $0,018$  a 5 celdas. De allí en adelante el SAR tiende a

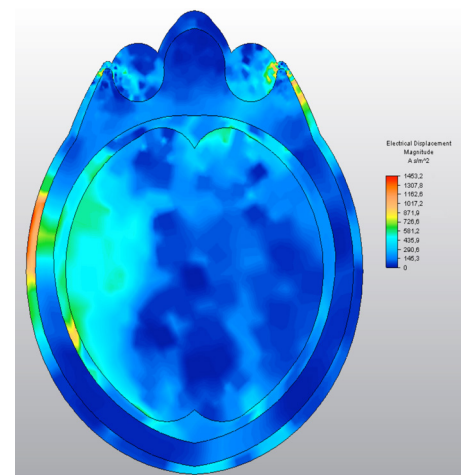


Figura 6. Desplazamiento del campo eléctrico en la cabeza: penetración del campo de un teléfono celular, D en  $As\cdot m^{-2}$ . Elementos finitos 2D. Cabeza de niño de 10 años. Incidencia normal. Polarización lineal en la entrada. Potencia 2,65W. Programa MEF de Autodesk Simulation Mechanical versión 2014.

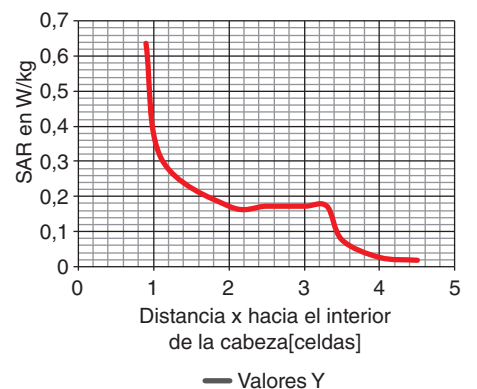


Figura 7. SAR para cabeza de niño de 10 años. Capa número 30. Obtenido por elementos finitos 2D. Se descarta el SAR en el cuero cabelludo, cráneo y fluido céfaloraquídeo, dejando sólo el efecto en el cerebro. La incidencia de la onda se tomó como normal y se consideró linealmente polarizada. Potencia 2,65W. Programa Autodesk Simulation Mechanical versión 2014.

cero. Para esta versión habría una diferencia máxima de 11,6% entre diferencias finitas y elementos finitos. Entre ambas versiones de elementos finitos existen diferencias máximas de 7% de SAR. Al desconocer el software tampoco se puede conocer la causa de la diferencia.

Todos los valores obtenidos serían los máximos posibles, dado que la modelación se realizó con incidencia normal de la onda, el fono en contacto con la piel y una potencia de 2,65W, la máxima empleada en Chile, donde las antenas retransmisoras están más distantes entre sí que en Europa.

## Conclusiones

### De la revisión bibliográfica

Los estudios analizados indican que debido a las microondas electromagnéticas emitidas por la telefonía móvil, pueden generarse cambios en la barrera hematoencefálica, en el metabolismo celular y funciones neurotransmisoras, entre otros.

Aparte de los efectos de subir la temperatura, habría también efectos no térmicos y otros producidos por campos magnéticos de baja frecuencia provenientes de la batería del teléfono.

Dentro de las secuelas neurológicas y fisiológicas analizadas estarían: tumores, afecciones cognitivas, hipersensibilidad electromagnética, genotoxicidad, alteraciones del sueño, del sistema inmunológico y del ADN.

Aumentaría el riesgo de tumores cancerosos cerebrales; estudios recientes revelan su ocurrencia a largo plazo, clasificándose como posiblemente carcinógenos a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia.

Estudios en niños indican la peligrosidad del uso de celulares por infantes.

### De los modelos matemáticos

El modelo de diferencias finitas para relaciones de absorción específica permitió predecir el SAR en un rango de variaciones del campo electromagnético cubierto por la constante Bowo de  $1e^{-5}$ . Los cálculos del SAR obtenidos de las predicciones por elementos finitos para determinar el desplazamiento del campo eléctrico indicaron una mayor coincidencia para la versión de 2009 (Figura 5). Sin embargo, la versión de 2014 del MEF tiene una buena coincidencia con los resultados obtenidos por Gandhi *et al.* (2011). Las herramientas computacionales modernas permiten modelar el efecto de los fonos celulares en el cerebro, existiendo algunas diferencias entre las predicciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de la Universidad de Tarapacá-Arica (Proyecto DIEXA número 8710-08) y la Universidad Politécnica de Madrid, y a Héctor Torres Silva, quien facilitó su conocimiento para elaborar el análisis por diferencias finitas.

## REFERENCIAS

Abdel-Rassoul G, Abou El-Fateh O, Abou Salem M, Michael A, Farahat F, El-Batanouny M, Salem E (2007) Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology* 28: 434-440.

AFSSET (2005) *Téléphonie Mobile et Santé, Rapport du Groupe d'Experts*. Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale (April 2005). [www.afsset.fr/index.php?pageid=712](http://www.afsset.fr/index.php?pageid=712) (Cons 07/2012).

Cardis E, Deltour I, Mann S, Moissonnier M, Taki M, Varsier N, Wake K, Wiart J (2008) Distribution of RF energy emitted by mobile phones in anatomical structures of the brain. *Phys. Med. Biol.* 53: 2771-2783.

Cardis E, Armstrong B, Bowman J, Giles GG, Hours M, Krewski D *et al.* (2011) Risk of brain tumours in relation to estimated RF dose from mobile phones, results from five INTERPHONE countries. *Occup. Environ. Med.* 68: 631-640.

Cardis E, Varsier N, Bowman J, Deltour I, Figuerola J, Mann S, Moissonnier, Taki M, Vecchia P, Villegas R, Vrijheid M, Wake K, Wiart J (2011) Estimation of RF energy absorbed in the brain from mobile phones in the INTERPHONE study. *Occup. Environ. Med.* 68: 686-693.

De Iulius G, Rhiannon J, Bruce V, King R, Aitken J (2009) Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS one* 4(7) e6446.

Drews F, Pasupathi M, Strayer D (2008) Passenger and cell phone conversations during simulating driving. *J. Exp. Psychol. Appl.* 14: 392-400.

Foster K, Repacholi M (2004) Biological effects of radiofrequency fields: does modulation matter? *Rad. Res.* 162: 219-225.

Franke H, Ringelstein ED, Stoegbauer F (2005) Electromagnetic fields (GSM 1800) do not alter blood-brain barrier permeability to sucrose in models in vitro with high barrier tightness. *Bioelectromagnetics* 26: 529-535.

Frey A (1998) Headaches from cellular telephones: Are they real and what are the implications? *Environ. Health Persp.* 106: 101-103.

Gabriel C, Gabriel S (1996) Compilation of the dielectric of body tissue at RF and microwave frequencies. [niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html](http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html) (Cons. 08/2012)

Gandhi OP, Morgan LL, de Salles AA, Han YY, Herberman RB, Davis DL (2011) Exposure limits: The underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children. *Electromag. Biol. Med.* 31: 34-51.

Glaser R (2005) Are thermoreceptors responsible for "non-thermal" effects of RF fields?. [www.fgf.de/publikationen/edition-wissenschaft/Edition\\_Wissenschaft\\_Nr21.pdf](http://www.fgf.de/publikationen/edition-wissenschaft/Edition_Wissenschaft_Nr21.pdf) (Cons 03/2013).

Hardell L, Carlberg M, Söderqvist F, Mild KH, Morgan LL (2007) Long-term use of cellular phones and brain tumours: Increased risk associated with use for  $\geq 10$  years. *Occup. Environ. Med.* 64: 626-632.

Hardell L, Carlberg M, Hansson Mild K (2009) Epidemiological evidence for an association between use of wireless phones and tumor diseases. *Pathophysiology* 16: 113-122.

Hung C, Anderson C, Horne J, McEvoy P (2007) Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset. *Neurosci. Lett.* 421: 82-86.

IARC (2011) IARC Classifies Radiofrequency Electromagnetic Fields as Possible Carcinogenic to Humans. International Agency for Research in Cancer. [www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf) (Cons 06/2012).

ICNIRP (1998) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74: 494-505.

Informe SATI (2012) Dictamen e informe de la ANSES (Agencia Nacional Francesa de Seguridad Sanitaria de la Alimentación, el Medio Ambiente y el Trabajo) acerca de las radiofrecuencias y la salud. [www.femp.es/.../Informe%20SATI%20sobre%20Limites%20radiofrecue](http://www.femp.es/.../Informe%20SATI%20sobre%20Limites%20radiofrecue)

Interphone Study Group (2010). Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: Results of the Interphone international case-control study. *Int. J. Epidemiol.* 39: 675-694.

Krause C, Björnberg C, Pesonen M, Hultén A, Liesivuori T, Koivisto M, Revonsuo A, Laine M, Hämäläinen H (2006) Mobile phone effects on children's event-related oscillatory EEG during an auditory memory task. *Int. J. Rad. Biol.* 82: 443-540.

Krause C, Pesonen M, Haarala B, Hämäläinen H (2007) Effects of pulsed and continuous wave 902 MHz mobile phone exposure on brain oscillatory activity during cognitive processing. *Bioelectromagnetics* 28: 296-308.

Kuribayashi M, Wang J, Fujiwara O, Doi Y, Nabae K, Tamano S, Ogiso T, Asamoto M, Shirai T (2005) Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood-brain barrier in immature and young rats. *Bioelectromagnetics* 26: 578-588.

Lakhtakia A, Varadan K, and Varadan V (1988) Time-harmonic electromagnetics fields in chiral media. *Lect. Notes Phys.* 5: 175-184.

Lee G, Neutra R, Hristova L, Yost M, Hiatt (2002) A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages. *Epidemiology* 13: 21-31.

Lönn S, Ahlbom A, Hall, Feychting M (2004) Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. *Epidemiology* 15: 653-659.

Luria R, Eliyahu I, Hareuveny R, Margalio M, Meiran N (2009) Cognitive effects of radiation emitted by cellular phones: The influence of exposure side and time. *Bioelectromagnetics* 30: 198-204.

OFPR (2007) Comments on the Danish cohort study on mobile phones. Oficina Federal para Protección Radiológica. Bundesamt für Strahlenschutz. Salzgitter, Alemania. [www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf) (Cons 05/2012). OJO - LINK???

OMS (2011a) *Campos Electromagnéticos y Salud Pública: Teléfonos Móviles*. Nota Descriptiva



- Nº 193, Junio 2011. [www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/es/](http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/es/) (Cons 12/ 2013).
- OMS (2011b) Uso del celular al volante: un problema creciente de distracción del conductor. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza.
- Panagopoulos D, Chavdoula E, Nezis I, Margaritis L (2007) Cell death induced by GSM 900 MHz and DCS 1800 MHz mobile telephony radiation. *Mutat. Res.* 626: 69-78.
- Rööslü M (2008) Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: A systematic review. *Environ. Res.* 107: 277-287.
- Ruediger H (2009) Genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields. *Pathophysiology* 16: 67-69.
- Sage C Carpenter D (2009) Public health implications of wireless technologies. *Pathophysiology* 16: 233-246.
- Salford L, Brun A, Eberhardt J, Malmgren L, Persson B (2003) Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ. Health Persp.* 111: 881-883.
- Salford L, Nittby H, Brun A, Grafstrom G, Malmgren L, Sommarin M, Eberhardt J, Widegren B, Persson B (2008) The mammalian brain in the electromagnetic fields designed by man with special reference to blood-brain barrier function, neuronal damage and possible physical mechanisms. *Progr. Theor. Phys.* 173(Suppl.): 283-309.
- SAR (2013) *The Complete SAR List for All Phones, Europe.* [www.sarvalues.com/eu-complete.html](http://www.sarvalues.com/eu-complete.html) (Cons. 03/2013).
- Schoemaker M, Swerdlow A, Ahlbom A, Auvinen A, Blaasaas K, Cardis E *et al.* (2005) Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: Results of the INTERPHONE case-control study in five North European countries. *Br. J. Cancer* 93: 842-848.
- Schüz J, Böhler E, Berg G, Schlehofer B, Hettinger I, Schlaefer K, Wahrendorf J, Kunna-Grass K, Blettner M. (2006) Cellular Phones, Cordless Phones, and the Risks of Glioma and Meningioma (INTERPHONE Study Group, Germany). *Am. J. Epidemiol.* 163: 512-520.
- Schüz J, Jacobsen R, Olsen J, Boice J, McLaughlin J, Johansen C (2006) Cellular telephone use and cancer risk: update of a nationwide Danish cohort. *J. Nat. Cancer Inst.* 98: 1707-1713.
- Torres H (2003) SAR Simulation for chiral waves in head model. *Rev Fac Ing UTA* 11: 3-9.
- Wake K, Varsier N, Watanabe S, Taki M, Wiart J, Mann S, Deltour I, Cardis E. (2009) The estimation of 3D SAR distributions in the human head from mobile phone compliance testing data for epidemiological studies. *Phys Med Biol* 54:5695e706.
- WHO (2007) *Extremely Low Frequency Fields. Environmental Health Criteria.* Monograph Nº 238. World Health Organization. Geneva, Switzerland.

## NEUROLOGICAL EFFECTS ON CELL PHONES: LITERATURE REVIEW AND MATHEMATICAL MODELS

Ernesto Ponce López, Daniel Ponce Saldías and Max Andresen Hernández

### SUMMARY

The electromagnetic radiation emitted by mobile phones and base antennas can penetrate tissues of the human head, and can be absorbed and transformed into heat. Due to the increase of mobile telephony, there is interest in studying its effects on human health. An analysis of the medical literature from 1996 to 2013 was carried out through internet searches using Medline and PubMed. Using mathematical modeling, the effect of 0.9GHz frequency was studied. The finite difference model was used to predict specific absorption ratios in  $W \cdot m^{-2}$ . The finite element model was based on a horizontal section of a 10 years old child head at eye level. Two dimensional analysis and a minimum thickness were used. The finite difference model pre-

dicted specific absorption ratios reaching  $0.72W \cdot m^{-2}$ , while 2.0 is admitted by the European Union. Calculations of absorption obtained from finite element predictions (to determine the displacement of the electric field) showed a better match for the 2009 version ( $0.685W \cdot m^{-2}$ ). The new 2014 version peaked at  $0.636W \cdot m^{-2}$ , but has slight differences between the 2nd and 3rd subdivision of the cerebral hemisphere. However, this latest version of the finite element software has a good agreement with the results obtained by other authors. Modern software tools allow modelling the effect of cell phones on the brain but there are some minor differences between the predictions of different computer programs.

## EFEITOS NEUROLÓGICOS POR TELEFONES MÓVEIS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MODELOS MATEMÁTICOS

Ernesto Ponce López, Daniel Ponce Saldías e Max Andresen Hernández

### RESUMO

A radiação eletromagnética emitida pela telefonia móvel e antenas bases, pode penetrar nos tecidos da cabeça humana, podendo ser absorvida e transformada em calor. Devido a aumento da telefonia móvel, existe interesse em estudar seus efeitos na saúde humana. Tem-se analisado a literatura médica desde 1996 até 2013, mediante procura em internet utilizando as bibliotecas Medline e PubMed. Em relação a modelos matemáticos, realizou-se o estudo para frequências de 0,9GHz. Foi utilizado o método de diferenças finitas para prever relações de absorção específica em  $W \cdot m^{-2}$ . O modelo de elementos finitos foi baseado em um corte horizontal da cabeça, na altura dos olhos as crianças 10 anos de idade. Foi utilizada uma análise de duas dimensões e uma espessura mínima. O modelo de diferenças finitas foi utilizado

para prever proporções específicas de absorção atingindo  $0,72W \cdot m^{-2}$ , com 2,0 como admitido pela União Europeia. Cálculos de absorção de previsões obtidas a partir de elementos finitos (para determinar o deslocamento do campo elétrico) mostrou uma melhor correspondência para a versão de 2009 ( $0,685W \cdot m^{-2}$ ). A nova versão 2014 atingiu um pico de  $0,636W \cdot m^{-2}$ , mas tem pequenas diferenças entre a segunda e terceira subdivisão de hemisfério cerebral. No entanto, esta versão mais recente do software de elementos finitos tem uma boa concordância com os resultados obtidos por outros autores. Ferramentas de software modernas permitem modelar o efeito de telefones celulares no cérebro, mais existem algumas pequenas diferenças entre as previsões de diferentes programas de computador.