

Estudio de los efectos de la radiación en el cerebro de ratas expuestas en una cavidad GTEM a 900 y 1800 MHz.

Julio C. Brégains⁽¹⁾, Elena López Martín⁽²⁾, F. Javier Jorge Barreiro⁽²⁾, Jose Luis Sebastián Franco⁽³⁾, Eduardo Moreno Piquero⁽¹⁾ y Francisco J. Ares Pena⁽¹⁾,

fajulio@usc.es, cmelena@usc.es, cmjorge@usc.es, jlsf@fis.ucm.es, famoreno@usc.es, faares@usc.es.

⁽¹⁾ Dpto. de Física Aplicada, Fac. de Física, Campus Sur, Universidad de Santiago de Compostela, 15782, Santiago de Compostela.

⁽²⁾ Dpto. de Ciencias Morfológicas, Fac. de Medicina, Campus Norte, Universidad de Santiago de Compostela, 15782, Santiago de Compostela.

⁽³⁾ Dpto. de Física Aplicada III, Universidad Complutense de Madrid, 2804, Madrid.

Abstract- Nowadays, the ever increasing use of cellular phones is becoming a widespread source of non-ionizing electromagnetic radiation. In this study, we investigated possible biological effects on brain of rats exposed *in vivo* to electromagnetic (EM) fields -at frequencies of 900 and 1800 MHz-, generated in a GTEM chamber. The corresponding experimental system (ES) consisted of: a vector signal generator, a directional coupler, a spectrum analyzer, a power meter, and the GTEM chamber itself -where the animal was located with the help of an appropriate holder.

The 1g averaged peak SAR and mean SAR values in the brain and whole-body of the rat were estimated from experimental power measurements, and with the aid of a FDTD software tool. The ES was also used to study the morphological effects on the brain in rats given subconvulsive doses of picrotoxin, showing that the signals produced acute influence on their neuronal activity.

energía que retiene el cuerpo en relación con el calentamiento que éste sufre [3]. Sin embargo en algunos casos hay evidencias científicas que sugieren la presencia de efectos biológicos en exposiciones por debajo de los niveles de radiación permitidos [4].

Los sistemas experimentales de irradiación (cavidades) simulan la radiofrecuencia (RF) de los teléfonos móviles y estudian los efectos biológicos que puede producir la señal sobre animales pequeños. Estas cavidades pueden tener características electromagnéticas variables: ser de cámara reverberante [5], o bien utilizar ondas estacionarias [6] o viajeras [7]. El cálculo del SAR puede hacerse de forma térmica [8], utilizando el valor del campo eléctrico [9], o bien haciendo uso de modelos numéricos (*phantoms*) [10-11] con la ayuda de herramientas de cálculo basadas en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (*Finite Difference Time Domain*, FDTD).

Estudios previos experimentales en una cavidad de radiación de onda estacionaria que simula la señal GSM de RF de los teléfonos móviles trabajando a 900 MHz [12] nos permitió detectar cambios importantes en la actividad cerebral (clínicas, electroencefalográficas (EEG) y morfológicas) en un modelo subconvulsivo en ratas con picrotoxina.

El objetivo de este trabajo es estudiar el SAR en cuerpo y cerebro, e investigar los efectos biológicos en el cerebro, del modelo subconvulsivo en ratas hembra Sprague-Dawley expuestas *in vivo* a señales monocromáticas de RF a frecuencias $f=900$ y $f=1800$ MHz generadas en una cámara de irradiación de onda viajera GTEM (*Gigahertz Transverse Electromagnetic cell*).

I. INTRODUCCIÓN

En la última década se ha prestado particular atención a los potenciales riesgos que pueden tener los campos de radiofrecuencia generados en telecomunicaciones y utilizados de forma generalizada por la población. Una gran parte de los teléfonos móviles en Europa trabajan en el rango de frecuencias de 900 y 1800 MHz en el sistema global de comunicación de móviles (GSM). A pesar de que hay más de un billón de usuarios en más de 200 países que utilizan los teléfonos móviles diariamente, los potenciales riesgos biológicos y en la salud que envuelven la exposición a la radiofrecuencia (RF) de la radiación no son bien conocidos [1]. Debido a la proximidad del cuerpo al utilizar el móvil, particularmente con relación a la cabeza, las emisiones de radiación no ionizante deben de ser analizadas en campos cercanos.

Un gran número de organizaciones gubernamentales e independientes trabajan en la regulación de la emisión de las fuentes de contaminación electromagnética [2]. Las directrices que fijan estas organizaciones se focalizan primordialmente en los valores de la tasa de absorción específica (*Specific Absorption Ratio*, SAR) que analizan la

II. MATERIAL Y MÉTODOS

A continuación se describen tanto la configuración del sistema utilizado durante los experimentos como el método de experimentación en sí y la simulación requerida para estimar los valores de SAR de los animales.

A. Descripción del Sistema Experimental de Radiación

En la Fig. 1 se observa el sistema experimental. El Generador de Señales Vectorial (GSV) alimenta al amplificador AMP con una señal sinusoidal pura de 900 MHz o 1800 MHz regulada a la potencia requerida durante la irradiación. La salida procedente del AMP se conecta al Acoplador Direccional AD para pasar la señal directamente a la Cámara de Radiación GTEM en donde se encuentra la rata R irradiada, convenientemente posicionada en la zona de máxima uniformidad de campo [13], e inmovilizada mediante el cepo de metacrilato CR. El AD permite medir los valores de potencia incidente P_{IN} y reflejada P_{REF} , monitorizando y obteniendo el valor de la primera, mediante el Analizador de Espectros AE, y obteniendo el valor de la segunda con el Medidor de Potencia MP.

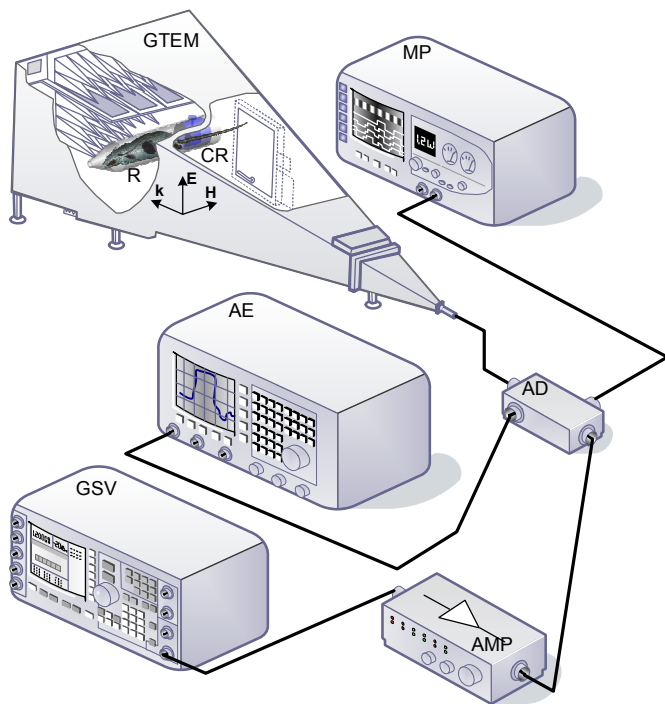


Fig. 1. Esquema (no a escala) del sistema utilizado. GTEM: Cámara GTEM Schaffner 250; GSV: Generador Vectorial de Señales Agilent E4438C (250 KHz-4GHz); AMP: Amplificador Aethercomm 0.8-3.2-10; AD: Acoplador Direccional NARDA 3282B-30 (800-4000 MHz); AE: Analizador de Espectro Agilent E4407B (9KHz-26,5GHz); MP: Medidor de Potencia Agilent E4418B; CR: Cápsula Contenedora de la Rata Bajo Prueba.

El uso del AE permite observar el tipo de onda incidente en la cámara, comprobando la pureza espectral de la sinusoide utilizada en este experimento.

Se observa que el campo incide sobre R en la dirección \mathbf{k} , con los vectores \mathbf{E} y \mathbf{H} posicionados perpendicular y paralelamente al eje principal de R, respectivamente. Consecuentemente, la zona izquierda de R recibe la máxima amplitud de campo, produciendo apantallamiento sobre la zona derecha.

Puesto que el campo no es completamente uniforme en dicha región, su módulo se estima por el valor medio incidente sobre R, calculado mediante la expresión [13]:

$$E = \sqrt{Z_0 P_{TR} / (h^2 \zeta)} \quad (1)$$

siendo h la altura de la bóveda (*septum*) en la zona de exposición (posición de la CR), ver Fig. 1, P_{TR} la potencia de entrada en la GTEM ($=P_{IN}-P_{REF}$), $Z_0=50 [\Omega]$ la impedancia de entrada de la GTEM, y ζ un coeficiente que depende del rizado del campo dentro de la zona de posicionamiento de CR¹, considerado igual a 2 [13]. El valor de E obtenido durante la experimentación de acuerdo a la P_{TR} utilizada se presenta en la sección correspondiente a los resultados.

B. Descripción del Tratamiento de los Animales.

Para poder llevar a cabo este estudio experimental se expusieron 36 ratas a la radiación de la cavidad GTEM, dividiéndolas en 6 grupos diferentes (6 ratas en cada grupo que pueden o no ser tratadas con picrotoxina 10 min antes de la radiación), de acuerdo al siguiente esquema experimental:

- Grupo 1: Inyección con picrotoxina y sin radiación
- Grupo 2: Inyección con picrotoxina y radiación a 0,9 GHz
- Grupo 3: Inyección con picrotoxina y radiación a 1,8 GHz
- Grupo 4: Sin picrotoxina y con radiación a 1,8 GHz
- Grupo 5: Sin picrotoxina y con radiación a 0,9 GHz
- Grupo 6: Sin picrotoxina y sin radiación

Los animales, convenientemente inmovilizados mediante CR, (ver Fig.1), fueron radiados individualmente durante 1 hora. Una vez finalizada la radiación, se realizaron estudios postmortem en el cerebro de cada animal (mediante técnicas de inmunohistoquímica con el anticuerpo C-Fos). Posteriormente, para cada grupo de animales, se hacen recuentos de las neuronas activadas (c-fos positivas) en varias secciones (0,32 x 0,24 mm²) de la corteza cerebral utilizando un microscopio Nikon eclipse E200 (con un aumento de 20X) acoplado a un software de morfometría (Kappa Monrovia, CA, USA).

C. Descripción de las Simulaciones.

Los valores de SAR se han estimado con la ayuda del SEMCAD X [11], un software de simulación basado en el método FDTD, según se ha comentado anteriormente. Para ello, se utilizó un modelo numérico de rata Sprague-Dawley de 198,3 gramos (modelo R8, [11]), ensamblada en cortes de 1,15 mm (obtenidos con imágenes de resonancia magnética) y compuesta por 60 tejidos diferentes. El modelo numérico fue radiado con una onda plana incidiendo sobre la zona izquierda del animal, siendo el campo magnético \mathbf{H} paralelo a su eje principal (ver Fig.1). El valor de campo E fue especificado por la ec. (1). Las simulaciones (ejecutadas en un PC de escritorio con procesador Intel Core 2 Quad a 2,40 GHz y 4 GB de RAM) se realizaron a 900 y 1800 MHz, con un mallado de 198.588 y 819.392 celdas volumétricas, obteniéndose tiempos de cómputo de 1 y 3,5 horas, respectivamente.

Las estimaciones del SAR fueron obtenidas mediante un factor de corrección aplicado a los valores obtenidos con las simulaciones numéricas, en proporción al peso de la rata numérica respecto de los pesos de los animales utilizados durante la experimentación, es decir:

$$SAR_E = SAR_S \times W_S / W_E \quad (2)$$

¹ Este factor también depende de la modulación de la señal, aunque en el presente caso esto no tiene influencia, puesto que la señal es sinusoidal pura.

donde SAR_E es la estimación del SAR experimental, SAR_S es el valor de SAR obtenido durante la simulación, $W_S=198,3$ [g] es el peso del modelo numérico, y W_E [g] es el peso del animal bajo experimentación.

III. RESULTADOS

A. Estimaciones de SAR.

Se irradiaron los animales con una $P_{TR}=0,5$ [W], colocados en la posición de la bóveda con $h=0,215$ [m], dando como resultado un valor de campo $E=16,44$ [V/m], ver ec. (1).

Grupo	W_E [g]		f [MHz]	SAR_E [W/kg]			
				Cuerpo		Cerebro	
				Prom.	Pico	Prom.	Pico
2	Min.	197.5	900	0.006	0.023	0.002	0.003
	Max.	248.3		0.005	0.018	0.002	0.002
	Prom.	224.9		0.006	0.020	0.002	0.002
3	Min.	205.1	1800	0.007	0.025	0.019	0.021
	Max.	285.0		0.005	0.018	0.014	0.015
	Prom.	236.9		0.006	0.022	0.016	0.018
4	Min.	200.6	1800	0.007	0.026	0.019	0.022
	Max.	230.0		0.006	0.023	0.017	0.019
	Prom.	215.6		0.006	0.024	0.018	0.020
5	Min.	200.2	900	0.006	0.022	0.002	0.003
	Max.	244.5		0.005	0.018	0.002	0.002
	Prom.	212.9		0.006	0.021	0.002	0.003

Tabla 1. Listado de valores de SAR experimental estimados mediante simulación, ver ec. (2). Todos ellos corresponden a un valor $P_{TR}=0,5$ [W], obteniéndose un $E=16,44$ [V/m] para $h=0,215$ [m], ver ec. (1).

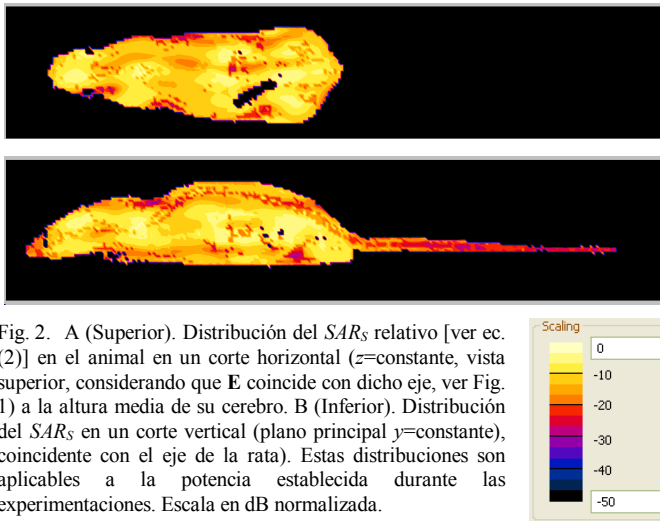


Fig. 2. A (Superior). Distribución del SAR_S relativo [ver ec. (2)] en el animal en un corte horizontal ($z=$ constante, vista superior, considerando que E coincide con dicho eje, ver Fig. 1) a la altura media de su cerebro. B (Inferior). Distribución del SAR_S en un corte vertical (plano principal $y=$ constante), coincidente con el eje de la rata). Estas distribuciones son aplicables a la potencia establecida durante las experimentaciones. Escala en dB normalizada.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de SAR_E estimados, ver ec. (2), para los distintos grupos de animales radiados (Grupos 2 a 5, ver Sección II.B). Los valores de SAR_E en cerebro y cuerpo corresponden a los valores promediados espacialmente y valores pico promediado en 1

[g] de tejido, respectivamente. Los valores de SAR se calculan para el cerebro y para el cuerpo, porque en caso de obtener valores térmicos en el cuerpo, podrían ponerse en marcha los mecanismos de homeostasis (equilibrio) o de termorregulación en el cerebro.

Las Figs. 2 A y B presentan el patrón de SAR_S relativo en el cuerpo del modelo numérico de la rata, y en las que se observa cierta uniformidad en la distribución, con ciertos puntos de asimetría, consecuencia directa de la incidencia de la radiación sobre la zona izquierda del animal y de la propia asimetría en la distribución de sus órganos.

B. Efectos Morfológicos.

Finalizadas las exposiciones y realizados los estudios postmortem, se observó que el grado de marcaje neuronal tanto en la corteza cerebral como en las regiones subcorticales se modifica considerablemente entre los animales radiados (grupos 2, 3, 4, 5) y no radiados (1, 6). Comparativamente hablando, los niveles de marcaje neuronal son muy bajos en animales inyectados con dosis subconvulsivas de picrotoxina respecto (grupos 1, 2, 3) a los animales no inyectados con picrotoxina radiados o no radiados (grupos 4, 5, 6).

IV. CONCLUSIONES

La radiación experimental sobre animales pequeños en una cámara GTEM con señales monocromáticas a 900 y 1800 MHz, ha permitido la estimación de valores de SAR experimental, los cuales han alcanzado valores no térmicos [2], mediante la ayuda de un modelo numérico de rata de 198,3 gramos, utilizando un programa comercial que trabaja con la técnica FDTD. Valores de SAR similares obtenidos para frecuencias de 900 MHz (grupos 2 y 5) y 1800 MHz (grupos 3 y 4) determinaron un descenso en la activación neuronal (c-fós positivo) al someter a los animales a la acción simultánea de la picrotoxina y la radiación. Ello nos hace pensar que un estado previo de manipulación farmacológica a nivel neuronal puede potenciar los efectos biológicos de la radiación en el cerebro de las ratas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Secretaría General y de Investigación y Desarrollo de la Xunta de Galicia por el proyecto PGIDIT02 BFT 20601 que financió esta investigación y también agradecer la asistencia técnica de Rafael Fuentes, José Carlos Santos, Eva Domínguez y Eva García.

REFERENCIAS

- [1]. M. H. Repacholi, "Health risks from the use of mobiles phones", Toxicol. Letter, Vol. 120, págs. 323-331, 2001
- [2]. ICNIRP, 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., Vol. 74, págs. 494-522, 1998.
- [3]. S. Muñoz San Martín, J. L. Sebastián Franco, M. Sancho Ruiz, J. M. Miranda Pantoja, "Medición de radiaciones en los seres vivos", Investigación y Ciencia", Vol. 353, págs. 46-55, 2006.
- [4]. Independent Expert Group on Mobile Phones, "Mobile phones and health (Capítulo 5: Scientific Evidence), 2002.

- [5]. K. B. Jung, T. H. Kim, J. L. Kim, H. J. Doh, Y. C. Chung, J. H. Choi, J. K. Pack, "Development and validation of reverberation-chamber type whole-body exposure system for mobile-phone frequency", *Electromagnetic Biology and Medicine*, Vol. 27, págs. 73-82, 2008.
- [6]. A. Christ, T. Samaras, A. Klingenböck, N. Kuster, "Characterization of the electromagnetic near-field absorption in layered biological tissue in the frequency range from 30 MHz to 6,000 MHz", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 51, págs. 4951-65, 2006.
- [7]. M. Swicord, J. Morrissey, D. Zakharia, M. Ballen, Q. Balzano, "Dosimetry in mice exposed to 1.6 GHz microwave in a carousel irradiator", *Bioelectromagnetics*, Vol. 20, págs. 42-27, 1999.
- [8]. E. G. Moros, W. L. Straube, W. F. Pickard, "Compact shielded exposure system for the simultaneous long-term UHF irradiation of forty small mammals: II. Dosimetry", *Bioelectromagnetics*, Vol. 20, págs. 81-93, 1999.
- [9]. F. Schönborn, K. Pokovic, N. Kuster, "Dosimetric analysis of the carousel setup for the exposure of rats at 1.62 GHz", *Bioelectromagnetics*, Vol. 25, págs. 16-26, 2004.
- [10]. M. Burkhardt, Y. Spinelli, N. Kuster, "Exposure setup to test effects of wireless communications systems on the CNS", *Health and Physics*, Vol. 73, págs. 770-8, 1997.
- [11]. Schmid & Partner Engineering AG, "Reference manual for the SEMCAD simulation platform for electromagnetic compatibility, antenna design and dosimetry", 2006. Disponible en www.semcad.com.
- [12]. E. López Martín, J. L. Relova Quinteiro, R. Gallego Gómez, M. Peleteiro Fernández, F. J. Jorge Barreiro, F. J. Ares Pena, "GSM radiation triggers seizures and increases cerebral c-Fos positivity in rats pretreated with subconvulsive doses of picrotoxin", *Neuroscience Letters*, Vol. 298, págs. 139-144, 2006.
- [13]. Schaffner Electrotest GmbH, "GTEM Test Cells", 2005, catálogo de la cámara GTEM, disponible en www.schaffner.com.