

Cálculo del SAR en el Cerebro de Animales Pequeños Expuestos a la Radiación de un Sistema Experimental GSM. Efectos Biológicos.

E. Lopez Martin⁽²⁾, J. C. Bregains⁽¹⁾, A. Trastoy Rios⁽¹⁾, F. J. Jorge Barreiro⁽²⁾, J. L. Sebastián Franco⁽³⁾, E. Moreno Piquero⁽¹⁾, F. Ares Pena⁽¹⁾.

cmelena@usc.es, fajulio@usc.es, Ana.Trastoy-Rios@esa.int, cmjorge@usc.es, jlsf@fis.ucm.es,
famoreno@usc.es, faares@usc.es.

⁽¹⁾Grupo de Sistemas Radiantes, Departamento de Física Aplicada, Facultad de Física, Universidad de Santiago de Compostela, 15782 Santiago de Compostela.

⁽²⁾Departamento de Ciencias Morfológicas, Facultad de Medicina, Universidad de Santiago de Compostela, 15782 Santiago de Compostela.

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

Abstract—To investigate possible biological effects of exposure to electromagnetic (EM) fields –at frequencies of Global System for Mobile communication (GSM)– on the Central Nervous System (SNC), an exposure setup for *in vivo* experiments is presented. The setup consists of a metallic cage housing a methacrylate device for immobilisation of the animal and two antennas for transmission and reception, respectively. The main advantage of this setup is that the power absorbed by the animal can be directly measured through the external associated microwave circuitry. Such a subsystem is also used to control any possible spurious signal inside the enclosure and the power applied to the animal. The 1g averaged peak SAR and mean SAR values in the brain, and whole-body, of a rat are estimated from experimental power values and with the aid of a commercial FDTD application, by using a numerical rat phantom. The influence of the positioning of the rat is also considered in this study. With this setup, it was possible to observe the effects of GSM in the behaviour and neuronal activity on the brain animals, which showed certain acute influence on the cerebral activity.

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación de los posibles efectos biológicos de la exposición a campos electromagnéticos se realiza utilizando dispositivos experimentales en los que se somete a animales de laboratorio a la radiación controlada de una señal similar a la de la telefonía móvil. Estos dispositivos permiten el diseño de experimentos *in vivo* cuyo objetivo es investigar los efectos adversos de la interacción de las microondas en la cabeza de animales de experimentación, y más concretamente sobre el Sistema Nervioso Central (SNC).

En la literatura se pueden encontrar otros sistemas para la exposición local de la cabeza en animales de laboratorio,

como el carrusel [1–3] y el dispositivo con antena de lazo rectangular [4–5]. Estos sistemas están diseñados para exposiciones crónicas, con unas buenas condiciones electromagnéticas que minimizan los problemas de interferencia, a la vez que imponen un nivel de estrés muy bajo en los animales. Los animales se colocan con su hocico a muy pocos milímetros de la antena, para obtener así una exposición a la radiación más localizada en la cabeza. Sin embargo, estos sistemas de exposición no proporcionan una información directa de la potencia absorbida por el animal. La potencia absorbida puede ser calculada realizando una simulación numérica [1,3] o con análisis termométrico [2]. Muchos de los estudios que han utilizado estos sistemas fueron diseñados empleando modelos numéricos (*phantoms*) y ratas [3,6].

En este trabajo, la exposición a la radiofrecuencia de telefonía móvil de animales pequeños se realiza en una cavidad experimental de radiación que hemos diseñado previamente [7] y que permite la determinación del SAR (Tasa de Absorción Específica) promedio y el valor de SAR pico a partir de la medida de la potencia absorbida por el animal. Para este propósito se genera una onda estacionaria similar a la señal GSM dentro de la cavidad de radiación y se determina la distribución de potencia con la ayuda de un simulador electromagnético, para poder definir con precisión las condiciones de la exposición de radiofrecuencia.

El objetivo de esta publicación es realizar una detallada descripción de la obtención de las medidas experimentales que permitan realizar el cálculo de los valores de SAR en el cuerpo completo y en el cerebro de los animales radiados. Para estos cálculos se ha utilizado una aplicación comercial del método FDTD [8] con el correspondiente *phantom* numérico de la rata. Los valores de SAR obtenidos nos han permitido determinar si los efectos observados estaban o no por debajo de los niveles térmicos. Finalmente analizamos los efectos de la radiación en relación con el

comportamiento de los animales y el grado de activación neuronal postmortem en la corteza cerebral.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Para estudiar los posibles efectos de los campos de microondas sobre el SNC, estudiamos 32 ratas en 4 grupos diferentes (8 ratas por grupo, las cuales pueden o no ser previamente tratadas con picrotoxina¹). Los procesos de radiación GSM se realizan durante 2 horas, y cada uno de ellos se aplica individualmente a cada rata. Dentro de la cavidad, cada animal es ubicado en un cepo de metacrilato (ver Fig. 1). El comportamiento del animal, controlado mediante grabaciones de videocámara, se analiza posteriormente. La potencia absorbida por cada uno de ellos se determina mediante medidas experimentales de potencia incidente, transmitida y reflejada en el sistema [7]. De esta manera, la potencia absorbida puede ser calculada a partir de la diferencia de la potencia disipada en el sistema obtenida con y sin el animal dentro de la cavidad experimental. Para encontrar la posición óptima del cepo con el animal dentro de la cavidad, fue necesario determinar la distribución del campo dentro de la región de radiación [7]. Para ello se utilizó un software comercial FDTD [8] que permitió determinar un máximo y un mínimo de radiación. Estos datos permitieron conocer las posiciones más adecuadas para la colocación del cepo y de la antena receptora.

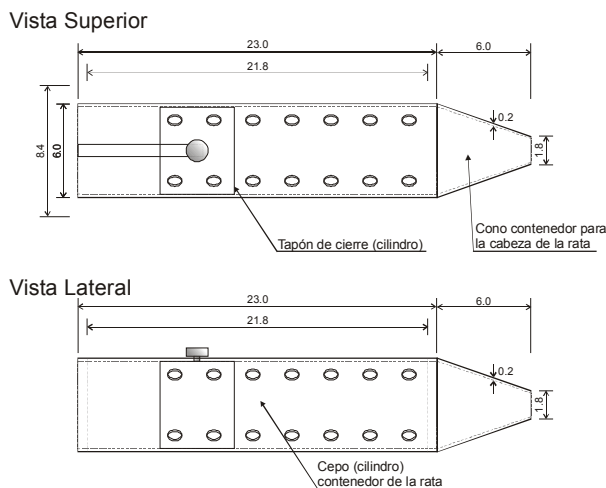


Fig. 1. Detalle del cepo contenedor de la rata.

La potencia entregada de la antena receptora fue controlada en una banda ancha de frecuencias para registrar las posibles señales espurias. A pesar de que se observaron dos señales significativas a 1800 y 2700 MHz, sus niveles máximos de potencia fueron de 24 y 37 dBm, respectivamente, por debajo de la señal principal de 900MHz.

Para calcular los valores promedio de 1g de pico SAR en el cerebro, se realizó la simulación de la distribución de campo $|E|$ dentro de la región de radiación con las antenas y el modelo animal situados en las posiciones óptimas

encontradas. Para esta simulación las antenas fueron consideradas como monopolos $\lambda/4$, y se usó un modelo numérico de 200 g para la rata. Dicho modelo está compuesto por 60 tejidos diferentes que constituyen la réplica numérica de un animal real estándar, escaneado en secciones de 1.15 mm de espesor mediante RMN (Resonancia Magnética) [8]. Finalmente, el valor de SAR obtenido de la simulación fue normalizado para los valores de potencia absorbida para cada animal. La proporción de absorción específica estimada SAR_E para el caso de los animales experimentales se puede obtener ajustando los valores simulados para los pesos actuales y potencias absorbidas² de las ratas:

$$SAR_E = SAR_S \times \frac{P_{A,E}}{P_{A,S}} \times \frac{W_S}{W_E}, \quad (1)$$

siendo:

SAR_S = SAR simulado.

$P_{A,E}$ = Potencia absorbida por la rata (experimental).

$P_{A,S}$ = Potencia absorbida por la rata numérica.

W_E = Peso de la rata (experimental).

W_S = Peso de la rata simulada.

La distribución del SAR en el modelo numérico se representa en la Figura 2.

Finalmente se realizaron estudios postmortem en el cerebro, para estudiar el grado de activación neuronal (mediante técnicas de inmunohistoquímica con el anticuerpo c-Fos) en los animales expuestos a radiación GSM, comparándolos con los grupos no expuestos.

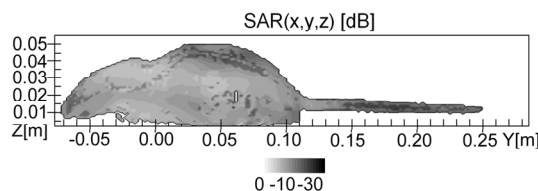


Fig. 2. Distribución del SAR en el animal.

III. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los valores que obtuvimos para diferentes potencias incidentes y absorbidas. En dicha tabla también aparecen los valores estimados de SAR que se obtuvieron usando la ecuación (1) para ratas irradiadas tratadas y no tratadas con picrotoxina. El uso de la ecuación (1), donde se combinan valores experimentales y simulados, se justifica a continuación. Se utilizó un grupo extra de 6 ratas (no especificado en el material y métodos) para validar los resultados obtenidos a través de la simulación. Estas ratas (cuyo peso medio es de 195.5 g) dieron un promedio de potencia absorbida de 60.28 mW. La potencia absorbida obtenida de la simulación fue de 60.76 mW. La comparación

¹ La picrotoxina es una droga que, en dosis adecuadas, puede inducir convulsión en animales inyectados intraperitonealmente [7].

² Utilizamos el término "SAR estimado" para indicar la extrapolación del valor calculado, teniendo en cuenta tanto la potencia absorbida como el peso de la rata, ver ecuación (1). Durante la simulación, la potencia puede especificarse fácilmente, pero el peso de la rata ha de permanecer fijo, puesto que el *phantom* numérico no puede modificarse libremente [8].

de ambos resultados da una media de error de 0.8% para la potencia absorbida del animal, y una media del error del 2.3% para su peso. Si tenemos en cuenta la magnitud tan pequeña de estos errores, se puede admitir que se comete un error muy bajo al emplear la ecuación (1) para obtener el valor de SAR de la rata.

Grupo	Pot. Abs. (AP)	Peso Prom.	SAR (estimado) prom. en Cerebro	SAR (estimado) prom. en Cuerpo	SAR (estimado) pico promed. en 1g de Cerebro	SAR (estimado) pico promed. en 1g de Cuerpo
	[mW]	[g]	[W/kg]			
I (Pier.+Rad.)	56.77	209.95	0.24	0.24	0.27	1.29
III (Sin Pier.+Rad.)	60.28	211.83	0.26	0.25	0.29	1.37

Tabla 1. Valores experimentales obtenidos con la cavidad experimental. Los valores de SAR estimados (promedio y pico, en cuerpo y cerebro), han sido obtenidos con la ayuda del software de simulación numérica [8], ver ecuación (1).

Los valores del SAR para el cuerpo y el cerebro de la rata están por debajo de los niveles térmicos permitidos.

Para determinar la influencia de la colocación de la rata en relación con su posición ideal inicial –el centro del cerebro de la rata está localizado en $(x,y,z) = (26.00, -3.00, 4.00)$ [cm] (coordenadas medidas desde el punto central de la base de la cavidad, ver [7])–, hemos medido la potencia absorbida por la rata cuando ésta sufre sucesivos desplazamientos de 1 cm o rotaciones de 15° respecto de su posición inicial, según se observa en la Fig. 3.

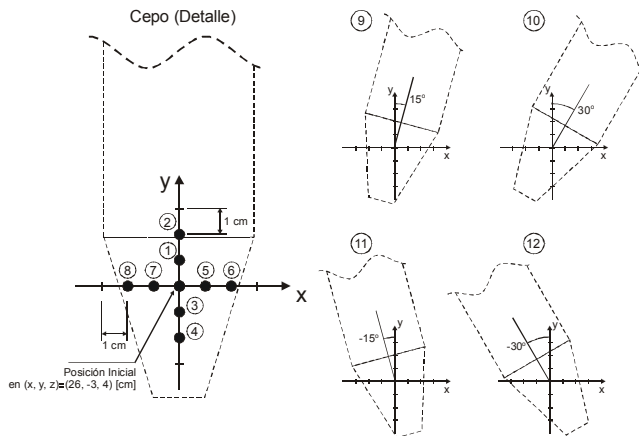


Fig. 3. Detalle de las posiciones ($n=1$ a 12) del cepo, utilizadas para obtener los datos de la Tabla 2. Obsérvese la flecha que indica la posición inicial del cerebro de la rata bajo estudio.

La posición 0 indica la localización ideal de la rata. Las posiciones 1 a 8 indican que el cepo está desplazado 1 o 2 cm hacia delante, hacia atrás, a la izquierda o a la derecha. Las posiciones 9 a 12 indican que el eje principal del cepo gira $\pm 15^\circ$ o $\pm 30^\circ$ respecto del centro de la posición inicial (el signo positivo indica rotación en el sentido de las agujas del reloj –y medidas respecto del eje y–).

Si tomamos como referencia la potencia absorbida en la posición inicial (P_{A0}), la desviación absoluta (en tanto por ciento) se puede calcular como,

$$|\Delta P|_{n,(\%)} = 100 \frac{|P_{A0} - P_{An}|}{P_{A0}} \quad (2)$$

donde P_{An} indica la potencia absorbida por el animal en la posición n (1 a 12). El correspondiente promedio de la desviación absoluta está dado por:

$$|\Delta P|_{av,(\%)} = (1/12) \sum_{n=1}^{12} |\Delta P|_{n,(\%)} \quad (3)$$

La Tabla 2 muestra los valores de coordenadas (x_n, y_n, z_n) , ángulos (α_n) , potencia absorbida y desviación para cada caso.

Cinco minutos después de la exposición a la radiación los animales tratados con picrotoxina mostraron mioclonías (movimientos musculares incontrolados localizados) y convulsiones intermitentes que duraron aproximadamente 20 minutos. Las ratas radiadas y no tratadas no mostraron en ningún momento actividad anormal o signos de convulsión. Finalmente, los animales “control” no radiados (con o sin tratamiento de picrotoxina) tampoco mostraron actividad locomotora anormal.

El grado de activación neuronal en varias áreas de la corteza cerebral, medida por cuantificación de neuronas positivas para c-Fos, aparece muy alto en los animales que han sufrido convulsiones, siendo aproximadamente la mitad en animales inyectados con picrotoxina y sin radiar. Finalmente el grado de activación neuronal es muy similar en animales radiados y no radiados que no han sido tratados.

Pos	Coordenadas del Centro del Cerebro			Ángulo	Potencia Absorbida	Desviación de Potencia
	x_n	y_n	z_n	α_n	P_{AEn}	$ \Delta P _{n\%}$
	[cm]			[deg]	[mW]	[%]
0	26.00	-3.00	4.00	0.00	60.28	0.00
1	26.00	-2.00	4.00	0.00	53.95	10.51
2	26.00	-1.00	4.00	0.00	64.44	6.90
3	26.00	-4.00	4.00	0.00	43.61	27.65
4	26.00	-5.00	4.00	0.00	53.72	10.88
5	27.00	-3.00	4.00	0.00	64.82	7.52
6	28.00	-3.00	4.00	0.00	66.28	9.95
7	25.00	-3.00	4.00	0.00	17.61	70.78
8	24.00	-3.00	4.00	0.00	27.83	53.83
9	26.00	-3.00	4.00	15.00	15.74	73.89
10	26.00	-3.00	4.00	30.00	21.24	64.77
11	26.00	-3.00	4.00	-15.00	74.98	24.39
12	26.00	-3.00	4.00	-30.00	81.65	35.45
Promedios ($n=1, 12$)					48.82	33.04

Tabla 2. Medidas experimentales de potencia absorbida cuando la rata se ubica en distintas posiciones, o el eje principal de la rata (de cabeza a rabo) se rota 15° y 30° respecto del semieje +y de la cavidad.

IV. DISCUSIÓN

La cavidad experimental que se ha diseñado permite la exposición controlada de RF confinada a ciertas regiones de interés y permite la medición directa de la potencia absorbida por la muestra biológica. Se han determinado y evitado las señales espurias. Los valores del SAR de los animales radiados son estimados por la combinación de mediciones de

potencia experimentales con las obtenidas en la simulación de la aplicación comercial de la FDTD [8].

Una de las ventajas del cálculo de dosimetría hecho con esta cavidad es que no usa métodos invasivos para los animales. Las medidas termométricas son generalmente obtenidas mediante un sensor termométrico fluoróptico de fibra óptica [6] o por análisis de cámara termométrica de infrarrojos con inserción de la sonda del termistor [2] en el cadáver de la rata. Para poder realizar este análisis, es necesario sacrificar los animales.

La experimentación completa utilizando la cavidad aquí propuesta finaliza con el sacrificio de los animales. Hay otros métodos para determinar el valor del SAR usando phantoms de ratas y modelos numéricos de ratas que validan las medidas de temperatura [1,3]. Sin embargo estos métodos no proporcionan valores directos de la potencia absorbida por el animal. La combinación de las observaciones experimentales y las simulaciones FDTD permitieron la obtención de mediciones no invasivas de SAR.

Además los animales, fueron orientados con los hocicos hacia la antena transmisora, modelada como un monopolo $\lambda/4$ [7] lo que facilita la colocación del animal en el lugar más adecuado dentro del campo electromagnético.

Debido a las paredes metálicas de la cavidad, la radiación establece una onda estacionaria dentro de ella, lo que implica que hay una distribución especial del campo con un máximo y un mínimo que puede afectar de forma variable en el cuerpo completo y en el cerebro de las ratas expuestas. Este trabajo ha sido realizado para mejorar nuestros conocimientos en el modelo aplicado a la onda estacionaria GSM que hasta ahora no había sido investigado.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe una forma novedosa y simple de calcular valores de SAR en animales pequeños sometidos a la exposición de ondas estacionarias GSM en una cavidad experimental. Dichos valores de SAR se obtienen mediante medidas experimentales de potencia absorbidas de la rata en la cavidad y la simulación numérica FDTD con un software comercial. Para completar este estudio se han considerado los errores de las potencias medidas (desviación absoluta respecto del valor inicial, en función de pequeños desplazamientos y giros). La obtención de valores por debajo de niveles térmicos y la aparición de efectos biológicos (principalmente neurológicos) en animales –con un modelo subclínico experimental con picrotoxina y expuestos a la radiación de 900 MHz con señal GSM– podrían cuestionar la inocuidad de las radiaciones no-ionizantes en la actividad cerebral de los mamíferos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Secretaría General de Investigación y Desarrollo de la Xunta de Galicia por el proyecto PGIDIT02 BFT 20601 que financió esta investigación y también agradecer la ayuda recibida por Juan Vassal'lo, y la asistencia técnica de Jose Carlos Santos, Eva Dominguez y Eva García.

REFERENCIAS

- [1] M. Burkhardt, Y. Spinelli, N. Kuster, "Exposure setup to test effects of wireless communications systems on the CNS", *Health Phys.*, Vol. 73, pp. 770–778, 1997.
- [2] M. Swicord, J. Morrissey, D. Zakharia, M. Ballen, Q. Balzano, "Dosimetry in mice exposed to 1.6 GHz microwaves in a carousel irradiator", *Bioelectromagnetics*, Vol. 20, pp. 42–47, 1999.
- [3] F. Schoenborn, K. Pokovic, N. Kuster, "Dosimetric analysis of the carousel setup for the exposure of rats at 1.62 GHz", *Bioelectromagnetics*, Vol. 25, pp. 16–26, 2004.
- [4] C. K. Chou, K. W. Chan, J. A. McDougall, A. Guy, "Development of a rat head exposure system for simulating human exposure to RF fields from handheld wireless telephones", *Bioelectromagnetics*, Vol. 20, pp. 75–92 1999.
- [5] P. Leveque, C. Dale, B. Veyret, J. Wiart, "Dosimetric analysis of a 900-MHz rat head exposure system", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 52, pp. 2076–2083, 2004.
- [6] E. G. Moros, W. L. Straube, W. F. Pickard, "A compact shielded exposure system for the simultaneous long-term UHF irradiation of forty small mammals: I. Electromagnetic and environmental design", *Bioelectromagnetics*, Vol. 19, pp. 459–468, 1998.
- [7] E. López Martín, F.J. Jorge Barreiro, A. Trastoy Ríos, F.J. Ares, E. Moreno, J.L. Sebastián Franco, B. Ribas Ozonas, "Dispositivo experimental para exposiciones de GSM a 900 MHz y su aplicación al estudio de ratas epilépticas", XX Simposio Nacional de la URSI, Gandía, Valencia, Septiembre 2005.
- [8] SPEAG–Schmid & Partner Engineering AG, "Reference manual for the SEMCAD simulation platform for electromagnetic compatibility, antenna design and dosimetry". Disponible en: <http://www.semcad.com>