

Mapas de potenciales cerebrales por un nuevo método de interpolación polinomial*

J. C. Pérez-Cobo**, F. J. Asencor¹, S. Sánchez-Suero*** y M. Pérez-Arroyo²

Departamento de Fisiología
Facultad de Farmacia
Universidad del País Vasco
Vitoria (España)

(Recibido el 9 de diciembre de 1992)

J. C. PÉREZ-COBO, F. J. ASENCOR, S. SÁNCHEZ-SUERO and M. PÉREZ-ARROYO. *Maps of Cerebral Potentials by a New Method of Polynomial Interpolation*. Rev. esp. Fisiol., 49 (2), 131-136, 1993.

The mapping of evoked cerebral activity is largely determined by the choice of the interpolation system used. When the number of electrodes is very large, practically any interpolation system is valid, but the geometrical and anatomical limitations imposed by the animals normally chosen for these experiments impede the use of a large number of electrodes; hence the overriding importance of a workable interpolation system. The polynomial interpolation method on the monomial structure is presented as valid, and compared with the pseudolineal interpolation method, which is more commonly used.

Key words: Brain electrical activity mapping, Interpolation, Rabbit, Cat.

Un problema importante para la elaboración de mapas de la actividad eléctrica cerebral es la elección del algoritmo de interpolación utilizado para su obtención. Se ha argumentado (9) que los mapas sólo deberían servir para la visualización y que

por lo tanto resulta conveniente utilizar muchos canales de registro, dado el bajo precio del *hardware*, con lo que el problema de interpolación pierde importancia. Aunque el argumento es razonable, también se puede defender la utilización del mejor *software* posible.

Entre los muchos métodos de interpolación posibles se han propuesto por algunos autores sistemas polinómicos de función continua. Los hay que pierden información, al definir el polinomio con menos coeficientes que el número de datos de los que se dispone (2). Otros (12), presentan la ventaja de establecer una función

* Estudio financiado por la UPV (Proyecto de Investigación 081.123/0080/89).

** A quien debe dirigirse la correspondencia. (Tel.: 945-13 16 66. Fax: 945-13 07 56).

*** Becario del Gobierno Vasco. Modalidad FPI.

¹ Dpto. de Física Aplicada II. Facultad de Farmacia. Vitoria.

² Dpto. de Fisiología. Facultad de Medicina. Alicante.

continua y una buena localización de los máximos y mínimos, pero la aplicación del sistema presenta una considerable dificultad matemática.

En este artículo se presenta como válido el método de interpolación polinómica basado en la estructura monomial (1) en el que la función de interpolación es un polinomio con no más monomios que el número de puntos de registro y cada uno de ellos de un grado tan pequeño como sea posible. Se compara este método con el sistema de interpolación basado en el cálculo de la media ponderada con la distancia entre los electrodos más próximos, utilizado por los sistemas comerciales de mapas de la actividad eléctrica cerebral y preconizados por multitud de autores (3, 5, 6, 7, 14).

Material y Métodos

El sistema de interpolación polinómica basado en la estructura monomial se ha utilizado para realizar mapas de la distribución de los potenciales evocados visuales (PEV) en la corteza cerebral de gatos y conejos. Para probar la idoneidad de un método de interpolación, se necesitaría conocer previamente la distribución del potencial sobre el cerebro; al no ser esto posible, sólo se pueden hacer conjeturas usando criterios tales como «coherencia», «razonabilidad» o «sensatez». Sin embargo, la distribución topográfica de los PEV está bastante bien determinada en ambos modelos animales (4, 10, 11) y, además, cabe la comparación con otros métodos de interpolación presentados por la literatura.

Método de registro. — Se utilizaron animales adultos, no albinos, registrados en condiciones agudas bajo anestesia con halotano (0,5 %) en una mezcla de O₂/N₂O. Al término de los experimentos se sacrificó al animal mediante una inyección intravenosa de pentotal en sobredosis. Los

electrodos, pequeños tornillos de acero inoxidable colocados tras previa trepanación, se situaron en las localizaciones señaladas en la figura 1. El electrodo de referencia se colocó, subcutáneo, en la pata delantera derecha de los animales o se utilizó la referencia balanceada esterno-dorsal (13). La señal se amplificaba mediante un electroencefalógrafo Alvar Minihuit Reega TR, de ocho canales, lo que obligaba a tres promedios sucesivos en todos los puntos de registro. Con la repetición de pruebas se comprobó la estabilidad de la señal. Los experimentos y la señal de disparo, provocada por un generador de pulsos Digitimer D100, se grabaron en cinta magnética mediante un registrador Hewlett Packard (3968A) de ocho canales, se digitalizaban y promediaban en un Spectrum Analyzer (mod. 3582A, Hewlett Packard) y se procesaban en un microordenador (HP85F, Hewlett Packard). El estímulo luminoso consistió en destellos de intensidad 0,69 julios/destello a una frecuencia de 1 Hz producidos por un aparato Photo Stimulator Strobotest-LT 1001 (Knott Elektronik). En algunos gatos también se utilizó la estimulación mediante modelos geométricos alternantes de tablero de ajedrez (*pattern reversal*) mediante un Digitimer Light Pattern Stimulator D112. La señal se grababa sin filtrar, aunque durante un análisis se sometió a un filtrado analógico, Digitimer Neurolog System, NL 115 y NL 125, que dejaban una banda pasante entre 10 y 1000 Hz.

Métodos de interpolación. — La representación espacial del PEV, para distintos instantes, se ha obtenido de los registros temporales. Se han utilizado dos métodos de interpolación. El primero corresponde a la interpolación pseudolineal que considera el área definida por los electrodos y atribuye a cada punto un valor de potencial obtenido como media de los valores en los electrodos más próximos, ponderados con el inverso del cuadrado de la distancia del punto al electrodo.

El segundo establece una función polinómica de tantos monomios como electrodos, mediante el sistema polinomial basado en la estructura monomial. La estructura monomial se establece a partir de la disposición de los electrodos.

Así:

$$U_{(x,y)} = A_1 + A_2x + A_3x^2 + A_4x^3 + A_5x^4 + A_6y + A_7xy + A_8x^2y + A_9x^3y + A_{10}x^4y + A_{11}y^2 + A_{12}xy^2 + A_{13}x^2y^2 + A_{14}x^3y^2 + A_{15}x^4y^2 + A_{16}y^3 + A_{17}xy^3 + A_{18}x^2y^3 + A_{19}x^3y^3 + A_{20}x^4y^3 + A_{21}x^2y^4$$

es la forma polinómica utilizada para la disposición de electrodos de la figura 1(a);

$$U_{(x,y)} = A_1 + A_2x + A_3x^2 + A_4x^3 + A_5x^4 + A_6y + A_7xy + A_8x^2y + A_9x^3y + A_{10}x^4y + A_{11}y^2 + A_{12}xy^2 + A_{13}x^2y^2 + A_{14}x^3y^2 + A_{15}x^4y^2 + A_{16}y^3 + A_{17}xy^3 + A_{18}x^2y^3 + A_{19}x^3y^3 + A_{20}x^4y^3 + A_{21}x^2y^4$$

es el polinomio para la disposición de electrodos de la figura 1(b), y finalmente,

$$U_{(x,y)} = A_1 + A_2x + A_3x^2 + A_4x^3 + A_5x^4 + A_6y + A_7xy + A_8x^2y + A_9x^3y + A_{10}x^4y + A_{11}y^2 + A_{12}xy^2 + A_{13}x^2y^2 + A_{14}x^3y^2 + A_{15}x^4y^2 + A_{16}y^3 + A_{17}xy^3 + A_{18}x^2y^3 + A_{19}y^4 + A_{20}xy^4 + A_{21}x^2y^4$$

para la disposición presentada en la figura 1(c). La sustitución de cada valor de la muestra en el primer miembro y de los valores correspondientes de las coordenadas en el segundo proporciona un sistema lineal de ecuaciones, de Kramer, con solución única para los coeficientes A_i que determinan el polinomio: esto es el sistema polinomial garantiza la existencia de la solución. Es preciso resolver el sistema de ecuaciones para cada instante del que se quiera conocer la distribución del potencial, pero el problema de cálculo con la

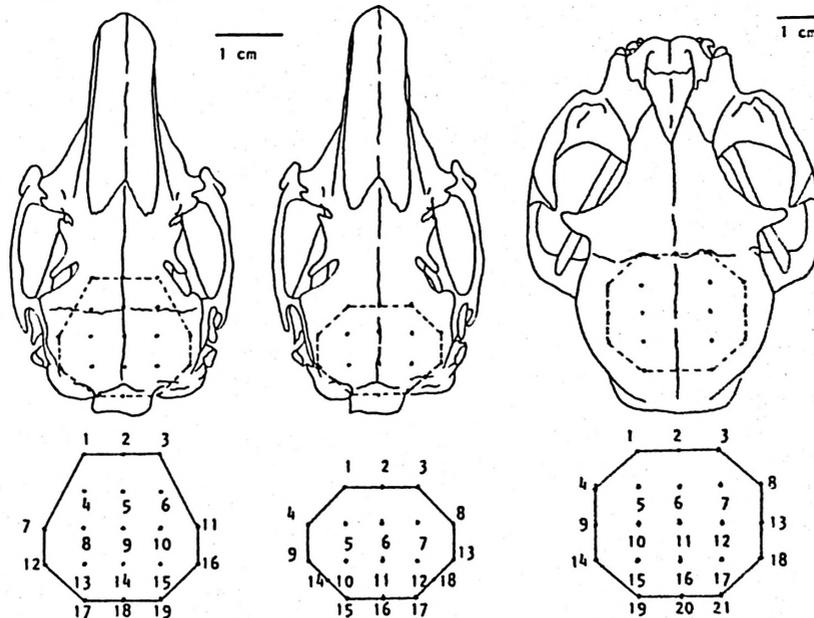


Fig. 1. Representación de la distribución de los electrodos de registro sobre los cráneos de conejo (izquierda y centro) y de gato (derecha) junto a las correspondientes superficies de interpolación. Nótese la diferente escala de los dibujos.

computadora es trivial. Una vez conocidos los coeficientes, A_i , que determinan el polinomio, será posible conocer el potencial, $U_{(x,y)}$, de cualquier punto de la superficie cerebral en el momento postestímulo del que se quiera dibujar el mapa.

Resultados

Los experimentos en conejo se realizaron con dos disposiciones de electrodos, una que consideraba 19 puntos de registro y otra que utilizaba 18. Se consideró más importante incrementar el número de electrodos en las zonas occipitales y desprestigiar los registros obtenidos delante de la sutura coronal por su escasa significación.

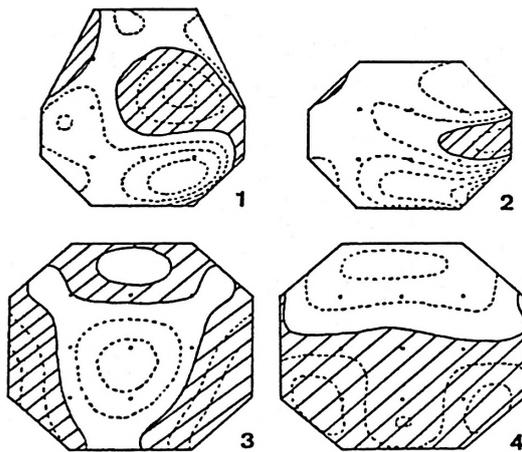


Fig. 2. Mapas de la actividad eléctrica evocada visualmente en cerebros de conejo y gato con el método de interpolación polinómica basado en la estructura monomial.

Las zonas rayadas representan positividad; ejemplos 1, 2 y 4: líneas equipotenciales cada 10 microvoltios; ejemplo 3: líneas equipotenciales cada 20 microvoltios. Todos los casos corresponden a los mapas obtenidos con una latencia de 25 ms postestímulo. 1 y 2: Conejo. Estimulación con destellos en el ojo izquierdo, caso de los 19 y 18 electrodos respectivamente. 3 y 4: Gato. Estimulación binocular con destellos y con inversión de modelo de tablero de ajedrez respectivamente.

En la figura 2 (parte superior) se presentan dos ejemplos de mapas obtenidos 25 ms después de estimular con destellos el ojo izquierdo del conejo y para cuya realización se ha utilizado el sistema de interpolación polinómica basado en la estructura monomial. El ejemplo 1 corresponde al caso de los 19 electrodos y el 2, el de los 18. Ambos mapas representan el mismo fenómeno, el inicio de una onda positiva en las partes anteriores del área visual I, mientras que un pico negativo aparece en zonas más posteriores.

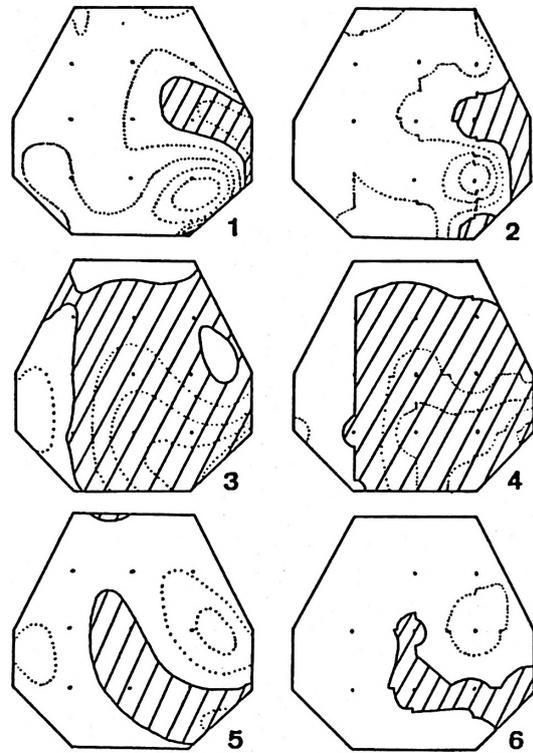


Fig. 3. Comparación del sistema de interpolación polinómica basada en la estructura monomial (columna de la izquierda) con el método pseudo-lineal del promedio ponderado con el cuadrado de la distancia (columna de la derecha).

La zona rayada representa positividad; líneas equipotenciales cada 10 microvoltios. Estimulación con destellos del ojo izquierdo de un conejo. 1 y 2: 25 ms postestímulo; 3 y 4: 30 ms postestímulo; y, 5 y 6: 35 ms después del estímulo.

La parte inferior de la figura 2 corresponde a mapas de la actividad eléctrica evocada visualmente en la corteza cerebral de gatos. El ejemplo 3 representa la actividad 25 ms después del destello binocular, mientras el ejemplo 4 corresponde al mismo tiempo después de estimular ambos ojos mediante la inversión del modelo de tablero de ajedrez. Para el caso de los destellos se aprecia una onda positiva ya lateralizada sobre los hemisferios, mientras aparece una onda negativa sobre los electrodos 11 y 16, los más cercanos al área 17 de Brodman. Los PEV de respuesta a la inversión de modelo comienzan con una onda positiva, situada sobre el área visual primaria, si bien de una latencia superior a la originada por una estimulación con destellos.

La figura 3 presenta la comparación de los mapas a los 25, 30 y 35 ms después del destello en el ojo izquierdo del conejo realizados mediante la interpolación polinómica (columna de la izquierda) o utilizando el promedio ponderado con el cuadrado de la distancia (columna de la derecha). Al dibujarse los mapas como formados por curvas de nivel equipotencial, se hacen manifiestas las discontinuidades en la frontera entre cada cuatro electrodos, discontinuidades inherentes a la lógica del proceso del promedio ponderado con la distancia. Los mapas obtenidos mediante la interpolación polinómica presentan una distribución más plausible de los máximos y mínimos del potencial eléctrico, mientras que el método pseudolineal circunscribe estos valores a los puntos de registro.

Discusión

Los datos de distribución de potencial son coherentes con los presentados por la literatura (4, 10, 11). Para el caso concreto del conejo la simetría en la distribución del potencial se debe a que los conejos pigmentados tienen una decusación quiasmática del 90 % (8): el hemis-

ferio más activo a la estimulación luminosa monocular es el contralateral al ojo estimulado.

En los casos experimentales aquí presentados, las distancias a cubrir por la interpolación resultan significativas con relación al tamaño de la superficie investigada, que queda limitada por el número de electrodos implantados y por otras consideraciones anatómico-geométricas. Las discontinuidades producidas por el sistema de interpolación por promedio ponderado pueden, por lo tanto, no ser despreciables. En realidad, este método sólo debería aceptarse en la elaboración de mapas de la actividad eléctrica cerebral cuando los requerimientos de resolución no son exigentes y el objetivo pretendido es, sólo, una estimación cualitativa de los resultados. La búsqueda de una mayor resolución y la posibilidad de hacer análisis numéricos posteriores al tratarse de una función continua hacen conveniente al método de interpolación polinomial basado en la estructura monomial (1). Los experimentos reproducidos con diferente distribución de electrodos (fig. 2, ej. 1 y 2) y las comparaciones realizadas con el método del promedio ponderado (fig. 3) proporcionan resultados idénticos. Esta reproductibilidad confirma la validez del método.

Tanto el sistema pseudolineal como el polinómico son de fácil cálculo y computación y permiten, además, una distribución de los puntos de registro independiente de requerimientos geométricos. Los mapas obtenidos mediante la media ponderada no son continuos y los valores extremos siempre están localizados sobre los sitios de los electrodos. Mediante la interpolación polinómica se consiguen mapas continuos con una buena distribución de máximos y mínimos.

La principal ventaja del método propuesto quizás no sea la elaboración de mapas de una resolución mejor. Siendo esto muy importante, lo es mucho más el hecho de que, describiendo el potencial me-

diante una función continua, queda a disposición del usuario todo el aparato de análisis funcional matemático para el estudio de las funciones. De esta forma, no sólo la estimación más o menos afortunada apoyada en la intuición es la encargada del análisis de los resultados, sino que tal actuación viene apoyada, corroborada o rebatida por el resultado numérico, siempre objetivo.

Agradecimiento

Los autores agradecen a J. M. Rodríguez Robledo la asistencia técnica prestada.

Resumen

La realización de mapas de la actividad eléctrica cerebral está determinada por la elección de un sistema de interpolación. Cuando el número de electrodos es muy grande, prácticamente cualquier sistema de interpolación resulta conveniente. No obstante, las limitaciones anatómicas y/o geométricas de los animales de experimentación impide, en la mayoría de los casos, utilizar un gran número de electrodos y de aquí se deduce la importancia de un buen sistema de interpolación. En este artículo se presenta como válido el método de interpolación polinómica basado en la estructura monomial y se compara con el método más utilizado en la práctica habitual, la interpolación pseudolineal.

Palabras clave: Mapas de la actividad eléctrica cerebral, Interpolación, Conejo, Gato.

Bibliografía

1. Asencor, F. J. y Gracia, J. M.: *Intern. J. Computer Math.*, 34, 259-269, 1990.
2. Ashida, H., Tatsumo, J., Okamoto, J. y Maru, E.: *Computers Biomed. Res.*, 17, 267-276, 1984.
3. Buschman, M. S., Rigal, F., Coppola, R., Cappelletti, J., King, C. y Johnson, J.: *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 53, 237-242, 1982.
4. Creutzfeldt, O. D. y Kuhnt, U.: En «Central visual information» (R. Jung, ed.), «Handbook of sensory physiology», Springer-Verlag, Berlín, 1973, vol. VII/3B, pp. 595-646.
5. Desmedt, J. E., Nguyen, T. H. y Bourguet, M.: *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 68, 1-19, 1987.
6. Duffy, F. H., Burchfiel, J. L. y Lombroso, C. T.: *Ann. Neurol.*, 5, 309-321, 1979.
7. Etevenon, P. y Guillou, S.: *Neuropsychobiol.*, 16, 146-151, 1986.
8. Giolli, R. A. y Guthrie, M. D.: *J. Comp. Neurol.*, 136, 99-126, 1969.
9. Lehman, D.: En «Evoked potentials» (R. Q. Cracco e I. Bodis Wollner, eds.). Alan R. Liss. Nueva York, 1986, 3-14.
10. Pérez-Cobo, J. C., Ruiz-Beramendi, M. y Pérez-Arroyo, M.: *Rev. esp. Fisiol.*, 46, 359-364, 1990.
11. Pérez-Cobo, J. C., Ruiz-Beramendi, M. y Pérez-Arroyo, M.: *Rev. esp. Fisiol.*, 46, 365-370, 1990.
12. Perrin, F., Pernier, J., Bertrand, O., Giard, M. H. y Echalié, J. F.: *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 66, 75-81, 1987.
13. Stephenson, G. W. y Gibbs, F. A.: *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 3, 237-240; 1951.
14. Walter, O., Cederbau, L. S. y Schirmer, J.: *J. Math. Phys.*, 25, 729-737, 1984.