

# Construção de Mapas Topográficos Cerebrais por Tesselação de Voronoi

R. G. Magalhães Júnior\*, L. R. S. Junior\*, F. T. Rocha\*\*, C. E. Thomaz\*

\*Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

\*\*Universidade de Cambridge, Cambridge, Inglaterra

e-mail: jr.rgmag@gmail.com

**Abstract** - *The registration of electrical potentials distributed on the scalp, called electroencephalography (EEG), represents a standard tool for the study of brain functions, allowing the process of interaction between a computer system and the brain to be facilitated and better understood. This study is usually based on the visual inspection of brain topographic maps (BTM) generated from the interpolation of the sampled signal for the estimation of the values in the cortical locations where the EEG is not acquired. This article describes a methodology for the generation of BTMs by means of EEG, highlighting a method of interpolation based on the Voronoi tessellation in 3 variations (1-neighbor, all-neighbors, all-neighbors + Gaussian). The interpolated signals were sampled in cognitive experiments with chess, obtaining better results for the all-neighbors technique.*

**Palavras-chave:** *Mapeamento cerebral, EEG, Interpolação.*

## Introdução

Os avanços da neurociência e das tecnologias para o mapeamento cerebral têm favorecido os estudos sobre o reconhecimento dos padrões de ativação do cérebro humano e, conseqüentemente, o desenvolvimento de interfaces cérebro-computador, em inglês BCIs (Brain Computer Interface) [1].

Na BCI, as medidas de atividade cerebral são traduzidas em mensagens ou comandos, permitindo a interação com sistemas computacionais sem recorrer às saídas convencionais do corpo humano, tais como a fala e o movimento muscular. Esses sinais são produzidos por estruturas cerebrais sob a forma de potenciais elétricos distribuídos continuamente ao longo do tempo e do espaço sobre o escalpo. O registro dessa eletricidade, denominado eletroencefalografia (EEG), representa uma ferramenta fundamental para o estudo das funções cerebrais, que geralmente visa o reconhecimento de padrões por meio da inspeção visual de mapas topográficos [2].

Os mapas topográficos cerebrais (MTC) foram

introduzidos com a finalidade de facilitar a análise espacial de dados encefalográficos, apresentando-os de maneira resumida [3]. Esses mapas transformam formas de onda aparentemente complexas em distribuições de superfície simples [4,5], que são geradas a partir de técnicas de interpolação para a estimativa dos valores nas localidades da superfície cortical onde o EEG não foi adquirido [2].

A utilização de técnicas de interpolação para estimar o potencial no escalpo foi investigada por Perrin et. al. [4] que avaliaram o desempenho das técnicas *spline* plana (SP) e 4-vizinhos mais próximos (4-NN). Os resultados desse estudo demonstraram que a técnica SP tem um desempenho superior à 4-NN. Resultados semelhantes foram obtidos por Soong et. al. [6], que também compararam o desempenho das técnicas 4-NN, SP e, adicionalmente, a técnica *spline* esférica (SS). Por outro lado, Soufflet et. al. [7] concluíram que não existem diferenças significativas entre as técnicas *Spline* e a NN.

Atualmente, são comuns os sistemas de mapeamento cerebral, principalmente os comerciais e de uso fechado, que não disponibilizam informações sobre como os seus mapas são produzidos. No entanto, conhecer todas as etapas de um determinado processo pode favorecer a interpretação dos resultados gerados a partir dele. Em virtude disso, este artigo apresenta uma metodologia para a geração de mapas corticais por meio de EEG, destacando um método de interpolação baseado na tesselação de Voronoi, inserindo-o ao movimento *open source*, que se baseia na partilha de propriedade intelectual e no seu desenvolvimento de forma colaborativa.

## Materiais e métodos

Variações da técnica de interpolação baseada na tesselação de Voronoi foram comparadas em mapas cerebrais gerados no Matlab a partir de sinais amostrados utilizando-se a plataforma OpenBCI, com 16 eletrodos posicionados de acordo com a descrição do modelo 10-20 [8], conforme a Figura 1, e taxa de amostragem de 125Hz. Os sinais uti-

lizados foram amostrados em experimentos cognitivos com xadrez em um trabalho desenvolvido por Silva Junior et. al. [9], sendo devidamente filtrados e processados segundo o método proposto por Rocha et. al. [10], que propõe a extração de características por meio do cálculo de entropia.

Define-se a entropia da correlação de um eletrodo  $i$  e os demais eletrodos  $j$ , como:

$$h(c_{i,j}) = -c_{i,j} \log_2 c_{i,j} - (1 - c_{i,j}) \log_2 (1 - c_{i,j}), \quad (1)$$

sendo  $c_{i,j}$  a correlação entre dois canais distintos.

A equação (1) mostra que se a correlação entre dois canais for igual a 1 ou igual a 0, então a entropia será igual a 0. Por outro lado, se a correlação for igual a 0,5, a entropia será máxima, igual a 1, indicando a maior possibilidade de a atividade elétrica do eletrodo  $c_i$  estar associada à atividade do eletrodo  $c_j$ .

Analogamente, a entropia da correlação média é calculada como:

$$h(\bar{c}_i) = -\bar{c}_i \log_2 \bar{c}_i - (1 - \bar{c}_i) \log_2 (1 - \bar{c}_i), \quad (2)$$

tal que,

$$\bar{c}_i = \frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^{n-1} c_{i,j}, \quad (3)$$

e  $n$  é a quantidade de eletrodos. Finalmente o valor de entropia de cada eletrodo é:

$$h(c_i) = \sum_{j=1}^n h(\bar{c}_i) - h(c_{i,j}). \quad (4)$$

Os resultados obtidos a partir da equação (4) foram submetidos à Análise de Componentes Principais, determinando-se uma base vetorial que represente a maior variância existente entre os dados analisados; e Análise Fatorial, baseada no algoritmo de rotação varimax das componentes principais, obtendo-se um fator para cada eletrodo, que podem ser codificados em cores para compor mapas discretos, como na Figura 2.

## Interpolação

O mapeamento para além dos pontos de localização de cada eletrodo se dá pela interpolação dos fatores que, neste caso, baseou-se no cálculo da média ponderada do subconjunto dos pontos que compõem cada região do Diagrama de Voronoi [11], Figura 1. O Diagrama de Voronoi decompõe um plano ou espaço em células (polígonos ou polítopos, respectivamente) de tal forma que cada

célula  $T_i$  anexa um ponto  $x_i$  e conglobera toda área (ou volume) mais próxima de  $x_i$  do que de qualquer outro ponto  $x_j$ :

$$T_i = \{x \in R^2 | d(x, x_i) \leq d(x, x_j) \forall j = 1, \dots, n\} \quad (5)$$

tal que  $d(x, x_j)$  denota a distância Euclidiana entre os pontos  $x_i$  e  $x_j$ . Diz-se que  $x_i$  é vizinho natural de  $x_j$  se suas respectivas células  $T_i$  e  $T_j$  tiverem arestas comuns ou ponto de contato. O número de vizinhos naturais de  $x_i$  é pelo menos  $N+1$ , sendo  $N$  a dimensão do espaço, e no máximo  $n-1$ ,  $n$  é o número de pontos que compõe o diagrama.

Uma vez que a tesselação de Voronoi tenha sido construída, a interpolação de um novo ponto  $x$ , contido em um espaço bidimensional, é obtida de tal forma que:

$$T(x) = \{z \in R^2 | d(z, x) \leq d(z, x_j) \forall j = 1, \dots, n\}, \quad (6)$$

$$T_i(x) = T(x) \cap T_i, \quad (7)$$

e definida como:

$$\hat{f}(x) = \sum_i p_i(x) z_i, \quad (8)$$

$$p_i(x) = \frac{\text{área}[T_i(x)]}{\text{área}[T(x)]}, |0 \leq p_i(x) \leq 1, \sum_i p_i(x) = 1. \quad (9)$$

Nota-se que  $p_i$  varia entre 1 e 0, respectivamente no ponto  $x_i$  e no ponto onde  $x$  deixa de ser um vizinho natural de  $x_i$ . Esse método resulta em uma função de continuidade  $C^0$ , pois sua derivada é descontínua no ponto  $x_i$ . Para se obter continuidade de ordem  $C^1$ , deve-se estimar uma função gradiente  $\nabla_z(x)$  para cada ponto  $x_i$  antes da interpolação. Então, substitui-se  $z_i$  na Equação (8) pelo polinômio  $g_i(x)$ :

$$g_i(x) = z_i + \nabla_z(x_i)^T (x - x_i) \quad (10)$$

Substitui-se, também, os pesos  $p_i(x)$  por  $w_i(x)$ :

$$w_i(x) = \frac{\frac{p_i(x)}{d(x, x_i)}}{\sum_i \frac{p_i(x)}{d(x, x_i)}} \quad (11)$$

Obtendo-se, desta forma:

$$\hat{f}(x) = \sum_i w_i(x) g_i(x) = \sum_i \frac{\frac{p_i(x)}{d(x, x_i)}}{\sum_i \frac{p_i(x)}{d(x, x_i)}} g_i(x) \quad (12)$$

Observa-se que os pesos utilizados na interpolação do vizinho natural <sup>1</sup> quantificam a influência

<sup>1</sup>Adjacente

dos vizinhos sobre o valor calculado no ponto de interpolação. O peso depende da área de influência, isto é, a área dos polígonos de Voronoi: uma área maior resulta em maior peso.

Os MTCs foram implementados a partir do Diagrama de Voronoi da Figura 1 utilizando-se a função de interpolação nativa do Matlab *scattered-Interpolant*, que se fundamenta nas equações descritas por Amidror [11].

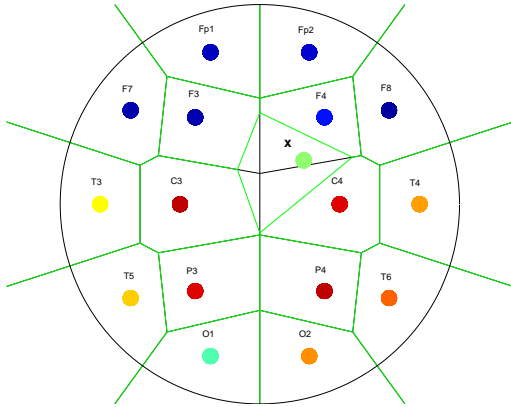


Figura 1 – Diagrama de Voronoi definido pelo sistema 10/20 com 16 eletrodos. As linhas pretas internas ao círculo mostram o diagrama antes da adição do ponto  $x$ , que provoca sua reestruturação (linhas verdes).

Em suma, assume-se  $x$  como uma coordenada qualquer definida no espaço bidimensional delimitado pela região cortical do cérebro (representada pelo círculo) e não amostrada pelo EEG. O fator de  $x$  (relativo à análise fatorial) é o valor resultante da interpolação dos fatores das células vizinhas ponderada pelas distâncias Euclidianas entre os pontos e pelas áreas as quais representam. Para o ponto  $x$  mostrado na Figura 1, as células ponderadas na interpolação são definidas por F3, F4, C3 e C4. De modo análogo, o mapeamento pode ser obtido estabelecendo-se  $X$  como um vetor contendo as  $N$  coordenadas da região de interesse.

## Resultados

A Figura 2 apresenta o mapa discreto contendo apenas os pontos que representam os eletrodos, seguido pelos mapas gerados com base na interpolação dos fatores associados à cada eletrodo por meio das técnicas: “o vizinho mais próximo” (1-NN) e “todos vizinhos naturais” sem e com o gradiente de uma função gaussiana, (T-NN) e (T-NNG) respectivamente.

Verifica-se que o método 1-NN gerou mapas com

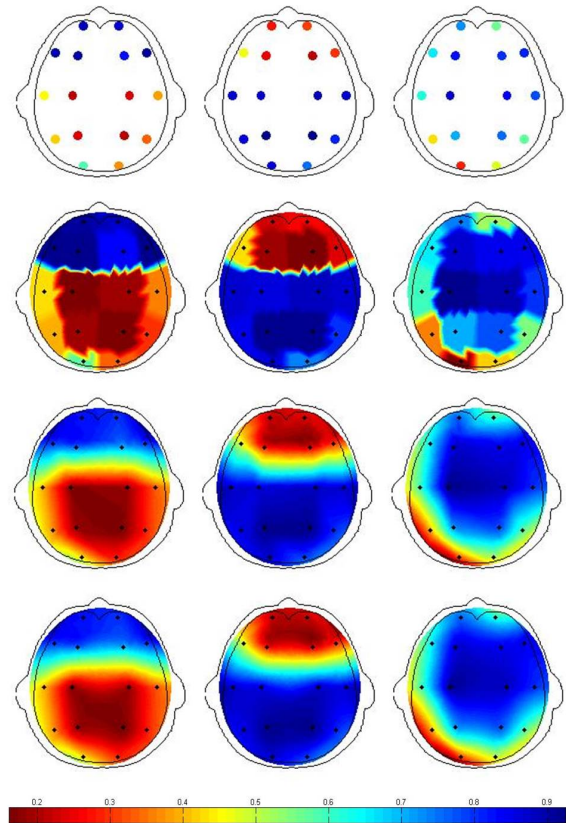


Figura 2 – Mapas cognitivos gerados para sinais de EEG amostrados em experimentos com xadrez. Modelos discreto, 1-NN, T-NN e T-NNG, de cima para baixo. Cada coluna é o fator que melhor representa cada um dos circuitos neurais ativados.

transições discretizadas entre as tonalidades, contrapondo os resultados produzidos pelas demais variações, que, embora tenham apresentado poucas diferenças entre si, permitem notar-se transições mais suaves sob efeito da função gaussiana.

Os mapas gerados através dos métodos descritos mostram a organização neural associada a atividade realizada durante a aquisição do sinal de EEG. Cada coluna é determinada pelo fator cujo autovalor foi maior do que 1 e representa um determinado circuito neural composto pela associação entre agentes ou áreas cerebrais mais adequadas para a solução da tarefa (referente ao jogo de xadrez), tal como descrito por [12].

## Conclusão

A avaliação de desempenho de técnicas de interpolação, aplicadas ao mapeamento cerebral, foi efetuada por diversos pesquisadores, sobretudo na década de 90, utilizando dados simulados ou sinais de EEG com diferentes densidades de eletrodos.

Neste trabalho, foi apresentada a técnica de extração de características baseada no cálculo de entropia do sinal e o método de interpolação baseado na tesselação de Voronoi para a geração de mapas cognitivos que mostram áreas cerebrais mais ativadas para determinados estímulos. Vale ressaltar que o objetivo aqui estabelecido não foi avaliar o desempenho dos interpoladores utilizando-se de rigorosos critérios comparativos - afinal os métodos descritos já estão consolidados na literatura - mas apresentá-los sob uma nova perspectiva: a criação de mapas ponderados por informações funcionais do cérebro. Essa ideia será explorada em trabalhos futuros, tendo em vista a geração de mapas correlacionando a tesselação de Voronoi às áreas cerebrais de Brodmann [13, 14].

## Agradecimentos

Ao Centro Universitário FEI pelo financiamento deste projeto e ao CNPq pela concessão de uma bolsa de Mestrado associada ao projeto 88887.136406/2017-00 - 465586/2014-7.

## Referências

- [1] D. Tan and A. Nijholt, "Brain-computer interfaces and human-computer interaction," in *Brain-Computer Interfaces*, pp. 3–19, Springer, 2010.
- [2] A. Infantosi, J. Silva, C. Tierra-Criollo, and D. Simpson, "Avaliação do desempenho de técnicas de interpolação no mapeamento cerebral utilizando simulação," *RBE Caderno de Engenharia Biomédica*, vol. 14, no. 2, pp. 71–96, 1998.
- [3] R. N. Harner, "Topographic analysis of multichannel eeg data," in *Statistics and topography in quantitative EEG - Proceedings of the international workshop on statistics and topographic problems in quantitative EEG*, pp. 49–61, 1988.
- [4] F. Perrin, J. Pernier, O. Bertrand, M. Giard, and J. Echallier, "Mapping of scalp potentials by surface spline interpolation," *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, vol. 66, no. 1, pp. 75–81, 1987.
- [5] F. H. Duffy, J. L. Burchfiel, and C. T. Lombroso, "Brain electrical activity mapping (beam): a method for extending the clinical utility of EEG and evoked potential data," *Annals of neurology*, vol. 5, no. 4, pp. 309–321, 1979.
- [6] A. C. Soong, J. C. Lind, G. R. Shaw, and Z. J. Koles, "Systematic comparisons of interpolation techniques in topographic brain mapping," *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, vol. 87, no. 4, pp. 185–195, 1993.
- [7] L. Soufflet, M. Toussaint, R. Luthringer, J. Gresser, R. Minot, and J. P. Macher, "A statistical evaluation of the main interpolation methods applied to 3-dimensional EEG mapping," *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, vol. 79, no. 5, pp. 393–402, 1991.
- [8] H. H. Jasper, "The ten twenty electrode system of the international federation," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 10, pp. 371–375, 1958.
- [9] L. R. S. Junior, F. H. Cesar, F. T. Rocha, and C. E. Thomaz, "EEG and eye movement maps of chess players.," in *ICPRAM*, pp. 434–441, 2017.
- [10] F. T. Rocha, A. F. Rocha, E. Massad, and R. Menezes, "Brain mappings of the arithmetic processing in children and adults," *Cognitive Brain Research*, vol. 22, no. 3, pp. 359–372, 2005.
- [11] I. Amidror, "Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey," *Journal of electronic imaging*, vol. 11, no. 2, pp. 157–176, 2002.
- [12] F. T. Rocha, R. G. de Magalhaes Junior, T. O. Horta, F. H. G. Cesar, D. M. D'Israel, W. da Silva, and C. E. Thomaz, "EEG acquisition and processing for cognitive brain mapping during chess problem solving," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 3, pp. 1129–1134, 2016.
- [13] K. Brodmann, *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues*. Barth, 1909.
- [14] A. Machado, "Estrutura e funções do córtex cerebral," *Neuroanatomia Funcional*, vol. 2, pp. 257–74, 2006.