

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO NO MAPEAMENTO CEREBRAL UTILIZANDO SIMULAÇÃO

A.F.C. Infantsi¹, J.L. Silva Jr.², C.J. Tierra-Criollo³ e D.M. Simpson⁴

RESUMO - Para avaliar as três técnicas de interpolação mais utilizadas no Mapeamento Topográfico Cerebral (4-vizinhos, *Spline* Plana e *Spline* Esférica), foram simuladas distribuições de potencial no escalpo, geradas por dipolos no meio interno do modelo das três camadas esféricas para a cabeça. Utilizando-se amostragens espaciais da distribuição de potencial com 19, 28 e 64 eletrodos, mapas topográficos foram estimados e o desempenho destas técnicas comparado, através de parâmetros globais de inacurácia, precisão e tendência. Os resultados indicam que o desempenho destas técnicas depende, não somente da profundidade do dipolo e do número de eletrodos, como também da posição relativa entre o máximo da distribuição e a rede de eletrodos. A técnica 4-vizinhos apresenta desempenho superior às demais para fontes próximas a um dado eletrodo de captação enquanto que as técnicas *Spline* mostraram-se mais adequadas para fontes mais distantes. Considerando o desempenho médio para diversas posições de dipolos, observa-se uma superioridade da técnica *Spline* Esférica sobre a Plana e, por fim, a técnica 4-vizinhos. A melhor ordem encontrada para as técnicas 4-vizinhos e *Spline* Plana foi 3 e 2, respectivamente, enquanto que para a *Spline* Esférica, as ordens 2 e 3 apresentam resultados bastante próximos. O estudo mostrou claramente a importância do conhecimento das condições que afetam o desempenho da técnica de interpolação utilizada, a fim de evitar erros na interpretação de mapas topográficos.

Palavras-chave: Mapeamento topográfico cerebral, Métodos de interpolação, EEG quantitativo

INTRODUÇÃO

Fontes cerebrais geram distribuições de potencial no escalpo a cada instante de tempo. O registro de um conjunto de sinais representando a variação temporal de tensão de diversas regiões do escalpo, denominado eletroencefalograma (EEG), representa uma ferramenta padrão para o estudo das funções cerebrais, cuja análise clínica é geralmente baseada na inspeção visual de um conjunto de traçados, visando o reconhecimento de padrões, um processo subjetivo, e, portanto,

¹ Professor Titular, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, E-mail: afci@peb.ufrj.br, Caixa Postal 68510, 21945-970 - Rio de Janeiro – RJ.

² M.Sc. em Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ

³ Doutorando, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, E-mail: carjulio@peb.ufrj.br

⁴ Professor Visitante, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, E-mail: david@peb.ufrj.br

altamente dependente da experiência e treinamento do eletroencefalografista. A análise quantitativa do EEG, através do uso de métodos computadorizados e técnicas de processamento de sinais, visa possibilitar a utilização mais eficiente e objetiva das informações usadas na análise convencional, além de possibilitar a investigação da existência de outras informações clinicamente relevantes, não óbvias à inspeção visual. Apesar da utilização de parâmetros objetivos, tais como a frequência da atividade rítmica, a ênfase metodológica ainda está na análise morfológica efetuada pelo especialista (Lopes da Silva, 1993). O baixo custo, o fato de ser um método de diagnóstico não invasivo e de proporcionar uma análise funcional ao invés de anatômica destacam-se como características marcantes deste método (Gevins *et alii*, 1995).

Mapas topográficos cerebrais (MTC) foram introduzidos como um método alternativo para a apresentação dos dados eletroencefalográficos, cuja finalidade é facilitar a análise espacial. Os mapas apresentam informações do EEG de forma resumida, tanto da distribuição espacial da atividade elétrica instantânea, como de parâmetros representativos das características do sinal em determinado trecho (Harner, 1988). Segundo Gevins *et alii* (1995), imagens anatômicas de alta resolução espacial podem ser obtidas com a Tomografia por Emissão de Pósitron (PET) e a Ressonância Magnética Funcional (fMRI), porém a resolução temporal necessária para acompanhar as variações dos padrões característicos de processos neurofisiológicos é muito maior que a permitida por estes métodos. Por outro lado, o EEG tem uma resolução temporal da ordem do conversor analógico digital utilizado, tipicamente entre 1 e 5 ms. Aplicações do MTC incluem investigação de lesões cerebrais (Harmony *et alii*, 1993), da interação de drogas aplicadas em pacientes (Vandesteene *et alii*, 1993) e de diferenças entre grupos, como o estudo de Babiloni *et alii* (1994) entre indivíduos normais e pacientes com mal de Parkinson. O MTC também tem sido aplicado a potenciais evocados visuais (Carreño-Rimauo e Infantosi, 1994), e somato-sensitivos (Liberati *et alii*, 1992). Alguns estudos comparam as alterações de mapas durante o exercício mental, seja de cálculos aritméticos (Inouye *et alii*, 1993), no processo de reconhecimento de palavras (Curran *et alii*, 1993) ou durante a realização de movimentos manuais simples (Burgess e Gruzelier, 1993).

Apesar de sua potencialidade, o MTC tem sido considerado somente um exame complementar ao EEG multicanal convencional (Duffy *et alii*, 1994). Para isto contribuem, provavelmente, as limitações decorrentes da amostragem espacial (número de eletrodos), do efeito de espalhamento (ocasionado pela existência de um volume condutor entre as fontes cerebrais e os pontos de captação no couro cabeludo) e da localização do eletrodo de referência (Nunez, 1995). Quanto às limitações causadas pelo efeito do espalhamento e pela referência adotada, a Derivação da Fonte (Hjorth, 1975), técnica que estima a segunda derivada espacial do potencial no escalpo (operador Laplaciano), tem sido empregada com bons resultados (Nunez, 1995). A respeito da densidade de eletrodos, Vaidyanathan e Buckley (1997) discutem uma ferramenta analítica para auxiliar na seleção do número de eletrodos para aquisição do EEG, porém esta seleção depende do experimento em questão e do número de canais disponíveis.

Na construção do MTC, técnicas de interpolação são necessárias para estimar os valores nos pontos onde o EEG não é adquirido. Quando a estimativa utiliza somente valores de eletrodos vizinhos ao ponto, tem-se uma interpolação de caráter local e, quando se utiliza valores de todos os eletrodos, a interpolação tem caráter global. As três técnicas de interpolação comumente utilizadas no MTC são a técnica local denominada 4-vizinhos mais próximos (NN) e duas globais, a *Spline*

Plana (SP), e a *Spline* Esférica (SS). Existem vários estudos avaliando o desempenho destas técnicas, para compará-las entre si ou para definir a ordem (parâmetro que modifica as características intrínsecas à técnica) mais adequada para a construção do MTC.

A utilização de técnicas de interpolação para estimar o potencial no escalpo, foi investigada por Perrin *et alii* (1987a) que avaliou o desempenho das técnicas SP e NN, utilizando distribuições de potencial no escalpo simuladas por dipolos no modelo de três camadas esféricas (Ary *et alii*, 1981). Os autores concluem que a técnica SP tem um desempenho superior à NN, sendo 2 a melhor ordem para a primeira e 3 para a segunda. Utilizando sinais EEG de indivíduos normais e pacientes com disfunção cerebral, Soong *et alii* (1993) compararam o desempenho das técnicas NN, SP e SS para estimar distribuições de potencial coletadas no escalpo, concluindo que as técnicas globais têm melhor desempenho que a local, sendo 2 a melhor ordem para NN e 3 a melhor para as *Splines*. Além disso, apontam que nenhuma destas técnicas é adequada com densidade de eletrodos semelhante à do sistema internacional 10-20. Baseado nos resultados da avaliação do desempenho de diversas técnicas para construção de mapas de parâmetros espectrais do EEG, Soufflet *et alii* (1991) concluíram que não existem diferenças significativas entre as técnicas *Spline* e a NN, sugerindo a ordem 3 para esta técnica local e ordem dois para as *Splines*.

Baseados em distribuições simuladas por dipolos no modelo de três camadas esféricas, alguns estudos também têm comparado o desempenho de técnicas de interpolação nos mapas gerados após a aplicação do Operador Laplaciano, como o de Perrin *et alii* (1987b), que propõe o uso da SP de ordem 3 para obter uma distribuição contínua diferenciável para o potencial no escalpo, e então aplicar este operador. Posteriormente, Perrin *et alii* (1989) propuseram a utilização da SS de ordem 4 para aplicação do operador Laplaciano que, comparada à SP, parece apresentar uma ligeira vantagem em regiões de baixa concentração de eletrodos. Investigando o método da Derivação da Fonte com o modelo esférico do crânio e dipolos a diferentes profundidades, porém localizados imediatamente abaixo de um dos eletrodos, Tierra-Criollo (1993) comparou as técnicas SP e NN (esta última aplicada após a utilização do operador Laplaciano) indicando que a NN mostrou-se mais adequada que a SP para fontes mais próximas à superfície do crânio, ocorrendo o contrário para fontes mais profundas.

Gevins *et alii* (1994), visando a integração dos dados fisiológicos com modelos anatômicos baseados em imagens de ressonância magnética (MRI), utilizaram 124 canais para registrar o EEG e indicaram que a localização dos máximos pode influenciar os resultados. Posteriormente, Gevins *et alii* (1995 e 1997) utilizando 124 e 115 eletrodos, respectivamente, apontaram o EEG de alta resolução como um método valioso e complementar a outras modalidades de neuro-imagens.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho das principais técnicas de interpolação utilizadas no Mapeamento Topográfico Cerebral - NN, SP e SS, bem como investigar as ordens mais adequadas. Tais técnicas serão avaliadas, através de simulação, utilizando-se parâmetros quantitativos globais, para diferentes densidades de eletrodos, profundidades da fonte e sua posição relativa aos eletrodos (localização do máximo).

BASES TEÓRICAS DAS TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO

Técnica dos 4-vizinhos mais próximos (NN)

Esta técnica é o método de interpolação mais comumente utilizado no MTC, em particular por ser de fácil implementação e descrição. Em notação vetorial, o valor do potencial no ponto $\mathbf{p} = (x, y)$ do escalpo é definido por (Soong *et alli*, 1993):

$$v(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{i=1}^k v(\mathbf{p}_i) d_i^{1-m}}{\sum_{i=1}^k d_i^{1-m}} \quad (1)$$

onde: $k = 4$, é o número de eletrodos vizinhos mais próximos a \mathbf{p} ; $m (> 1$ e inteiro) a ordem da interpolação; $v(\mathbf{p}_i)$ o potencial no i -ésimo eletrodo mais próximo localizado em $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$; e d_i a distância do ponto \mathbf{p} a este eletrodo.

Spline Plana (SP)

Uma superfície *Spline Plana* é obtida minimizando-se a energia de curvatura de uma lâmina infinita, obrigando-a a conter o conjunto de pontos conhecidos. Considerando n o número total de eletrodos posicionados em $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$ para a captação dos potenciais $v(\mathbf{p}_i)$, pode-se estimar o valor de potencial, v , num ponto do escalpo $\mathbf{p} = (x, y)$ com a SP de ordem m através de (Perrin *et alli*, 1987b):

$$v(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n s_i t_{m-1}(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i) + q_{m-1}(\mathbf{p}) \quad (2)$$

onde m é um inteiro maior que a unidade (a suavidade da superfície aumenta com m);

$$t_{m-1}(\mathbf{p}) = (x^2 + y^2)^{m-1} \log(x^2 + y^2) \quad (3)$$

e $q_{m-1}(\mathbf{p})$ um polinômio de grau $(m-1)$ dado por:

$$q_{m-1}(\mathbf{p}) = \sum_{d=0}^{m-1} \sum_{k=0}^d q_{kd} x^{d-k} y^k \quad (4)$$

Definindo-se os vetores:

$$\bar{\mathbf{Q}}^t = (q_{00}, q_{01}, q_{11}, \dots, q_{m-1, m-1}) \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{S}}^t = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (6)$$

$$\bar{V}^t = (v(\mathbf{p}_1), v(\mathbf{p}_2), \dots, v(\mathbf{p}_n)) \quad (7)$$

e as matrizes:

$$\bar{T} = (t_{ij} = t_{m-1}(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)) \quad (8)$$

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & \dots & \dots & x_1 y_1^{m-2} & y_1^{m-1} \\ 1 & \vdots & \vdots & & & & & & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & \dots & \dots & x_n y_n^{m-2} & y_n^{m-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

pode-se determinar \bar{Q} e \bar{S} resolvendo o sistema de equações:

$$\begin{cases} \bar{T} \bar{S} + \bar{E} \bar{Q} = \bar{V} \\ \bar{E}^t \bar{S} = \bar{0} \end{cases} \quad (10)$$

Segundo Harder e Desmarais (1972), a adição de uma pequena quantidade ε^2 no argumento do logaritmo de $t_{m-1}(\mathbf{p})$

$$t_{m-1}(\mathbf{p}) = (x^2 + y^2)^{m-1} \log(x^2 + y^2 + \varepsilon^2) \quad (11)$$

gera uma superfície que passa pelos n pontos e é infinitamente diferenciável. Perrin *et alii* (1987b) ressaltam a utilidade da inclusão da quantidade ε para o caso de $m = 2$, caso em que as derivadas de segunda ordem não existem. A inclusão da quantidade ε^2 (sendo ε da ordem de grandeza do raio de um eletrodo) corresponde a deformar a lâmina em pontos não infinitesimais.

Para utilização no MTC, a SP necessita que os dados, captados na superfície curva do escalpo, sejam previamente projetados numa superfície plana, que pode ser obtida através de qualquer método de projeção cartográfica.

Spline Esférica (SS)

Esta técnica pode ser vista como um interpolador para dados amostrados sobre uma superfície esférica, tendo sido inicialmente proposta por Wabba (1981). A SS pode ser apresentada como uma superfície esférica elástica que é deformada por forças pontuais. Como no método SP, a energia de curvatura (*bending energy*) da superfície entre os pontos a interpolar é minimizada. O potencial (deflexão) num ponto \mathbf{p} , localizado sobre a superfície da esfera, é dado por:

$$v(\mathbf{p}) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i q_m(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i) \quad (12)$$

onde \mathbf{p}_i são as posições dos n eletrodos sobre a esfera e

$$q_m(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i) = \frac{1}{4\pi} \sum_{w=1}^{\infty} \frac{2w+1}{w^m(w+1)^m} P_w(\cos(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)) \quad (13)$$

onde $\cos(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)$ denota o co-seno do ângulo formado entre \mathbf{p} e \mathbf{p}_i , e P_w é o polinômio de Legendre de w -ésima ordem. Para o cálculo de $q_m(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)$, utilizaram-se os dez primeiros elementos da série.

O vetor de coeficientes \bar{C} e o escalar c_o podem ser obtidos da solução do sistema:

$$\left(\bar{Q}_m + n\bar{I}\right)\bar{C} + c_o \bar{U} = \bar{V} \quad (14)$$

$$\bar{U}' \bar{C} = 0, \quad (15)$$

onde:

$$\bar{U} = [1, 1, \dots, 1]' \quad (16)$$

$$\bar{C} = [c_1, c_2, \dots, c_n]' \quad (17)$$

$$\bar{V} = [v(\mathbf{p}_1), v(\mathbf{p}_2), \dots, v(\mathbf{p}_n)]' \quad (18)$$

e \bar{Q}_m é uma matriz $n \times n$ cujos elementos são dados por:

$$\left(\bar{Q}_m\right)_{ij} = q_m(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j). \quad (19)$$

SIMULAÇÃO DE POTENCIAL NO COURO CABELUDO

A avaliação do desempenho de técnicas de interpolação aplicadas ao MTC com sinais EEG é dificultada pelo desconhecimento da distribuição de potencial verdadeira em todos os pontos da superfície do escalpo. Assim, um modelo para simular fontes cerebrais constitui-se em metodologia que permite controlar as condições de geração da distribuição a ser interpolada e, conseqüentemente, avaliar quantitativamente as técnicas de interpolação. Nas simulações de distribuições de potencial no escalpo, o modelo proposto por Ary *et alii* (1981), que considera as fontes cerebrais como dipolos de corrente, foi utilizado. O efeito da condução volumétrica através das diferentes estruturas anatômicas foi modelado assumindo-se a cabeça como formada por três camadas condutoras esféricas homogêneas e isotrópicas concêntricas, sendo a mais interna o tecido neural com condutividade σ e raio r_1 , envolvida por duas camadas representando, respectivamente, o crânio (condutividade σ_s e raio r_2) e o couro cabeludo (raio R e condutividade assumida como a

mesma do tecido neural). Os valores utilizados são os apontados por Rush e Driscoll (1969): $r_1 = 8,0$ cm; $r_2 = 8,5$ cm; $R = 9,0$ cm; $\sigma = 0,45$ (Ωcm)⁻¹; $\sigma_s = \sigma/80$.

O potencial em coordenadas esféricas (Figura 1), $V(r, \theta, \alpha)$, num determinado ponto do escalpo e devido a um dipolo de corrente de momento (m_x, m_y, m_z) localizado ao longo do eixo z , em $r = fR$, sendo f a excentricidade do dipolo (quanto maior, menor a profundidade), é dado por:

$$V(R, \theta, \alpha) = \frac{1}{4\pi\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} C_n f^{n-1} \left[nm_z P_n(\cos\theta) + (m_x \cos\alpha + m_y \sin\alpha) P_n^1(\cos\theta) \right] \quad (20)$$

onde P_n e P_n^1 são polinômios de Legendre e funções associadas de Legendre, e:

$$C_n = \frac{(2n+1)^3 s}{n(n+1)d_n} \quad (21)$$

$$s = \frac{\sigma_s}{\sigma} \quad (22)$$

$$d_n = \left[(n+1)s + n \right] \left[\frac{ns}{n+1} + 1 \right] + (1-s) \left[(n+1)s + n \right] (f_1^{2n+1} - f_2^{2n+1}) - n(1-s)^2 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^{2n+1} \quad (23)$$

$$f_1 = \frac{r_1}{R} \quad (24)$$

$$f_2 = \frac{r_2}{R} \quad (25)$$

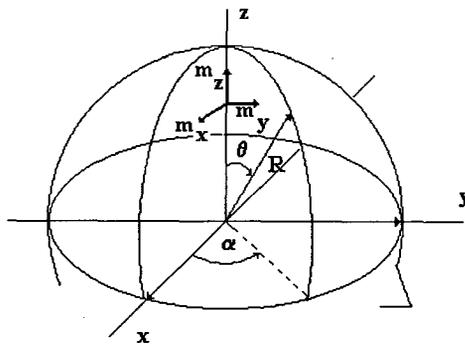


Figura 1. Sistema de coordenadas esféricas para o modelo da cabeça

Para um dipolo localizado fora do eixo z , qualquer outra posição pode ser obtida por rotação e/ou translação dos eixos. Neste modelo, dipolos de corrente localizados no interior do crânio geram distribuições de potencial no couro cabeludo cujas formas variam com a profundidade do dipolo. Dipolos mais próximos à superfície geram distribuições com componentes de frequência espacial mais altas (distribuições mais agudas), enquanto que dipolos mais profundos geram distribuições com componentes de frequência espacial mais baixos (distribuições suaves). Segundo os autores do modelo, a maioria das fontes corticais ocorre para excentricidades, f , entre 0,6 e 0,9.

Distribuições de potencial *original* (D_o)

Distribuições de potencial *original* foram geradas para redes de 51 x 51 elementos uniformemente distribuídos no escalpo com projeção radial (conserva o comprimento de arco dos círculos meridianos Perrin *et alii*, 1987b), tendo a aresta de cada elemento $0,02\pi R$ (1% do perímetro da circunferência central da esfera). Dipolos foram colocados a diferentes profundidades e localizações espaciais e, por facilidade na localização do máximo, utilizou-se orientação radial.

Distribuições de potencial *estimadas*

A amostragem espacial de D_o foi realizada para conjuntos de 19 ($D19$), 28 ($D28$) e 64 ($D64$) pontos, sendo a rede $D19$ equivalente à distribuição de eletrodos do Sistema Internacional 10-20 e, para $D28$, foram acrescentados os nove eletrodos propostos por Buschbaum *et alii* (1982). Os eletrodos em $D64$ foram posicionados uniformemente no escalpo. A partir de cada conjunto, foram aplicadas as três técnicas de interpolação com ordens variando de 2 a 4.

Os mapas topográficos referem-se aos valores nos 1950 elementos do interior da circunferência circunscrita à rede 51x51. A figura 2.a mostra o mapa da distribuição de potencial *original* gerada por um dipolo com excentricidade de 0,65 e localizado imediatamente abaixo da posição correspondente ao eletrodo C_z . A partir de $D19$ foram construídos os mapas das figuras 2.b, 2.c e 2.d utilizando-se as técnicas NN de ordem 4, SP de ordem 3 e SS de ordem 3, respectivamente. Gráficos tridimensionais para estes mapas são mostrados ao lado direito de cada figura de modo a auxiliar a análise visual. Nota-se que, na região próxima ao máximo, as técnicas *Spline* (figuras 2.c e 2.d) apresentam um maior espalhamento, quando comparadas à distribuição *original*, enquanto que a distribuição NN apresenta um menor espalhamento, sendo tal constatação já apontada por Tierra-Criollo (1993). Além disso, descontinuidades na distribuição NN também podem ser observadas, sendo, por outro lado, as distribuições para as técnicas *spline* mais suaves, conforme citado por Perrin *et alii*. (1987a). Aumentando-se a resolução espacial para $D64$, ocorreu uma sensível melhora nas superfícies interpoladas; o espalhamento observado nos mapas obtidos de $D19$ e interpolados com as *spline* não foi visualmente aparente com $D64$, sendo estes mapas bastante próximos daquele da distribuição *original*. Para $D64$, NN apresentou distribuição menos espalhada que a *original*, porém, como era de se esperar, com um número maior de oscilações.

Com o dipolo mais superficial (excentricidade de 0,85) e deslocado para o ponto médio entre dois eletrodos vizinhos, a distribuição *original* para $D64$ (figura 3.a) apresenta superfície mais aguda. No mapa estimado com NN (figura 3.b), nota-se a presença de dois picos posicionados nestes eletrodos vizinhos, sendo esta uma característica inerente à própria técnica, para a qual os máximos da distribuição sempre se encontram localizados nas posições dos eletrodos (Perrin

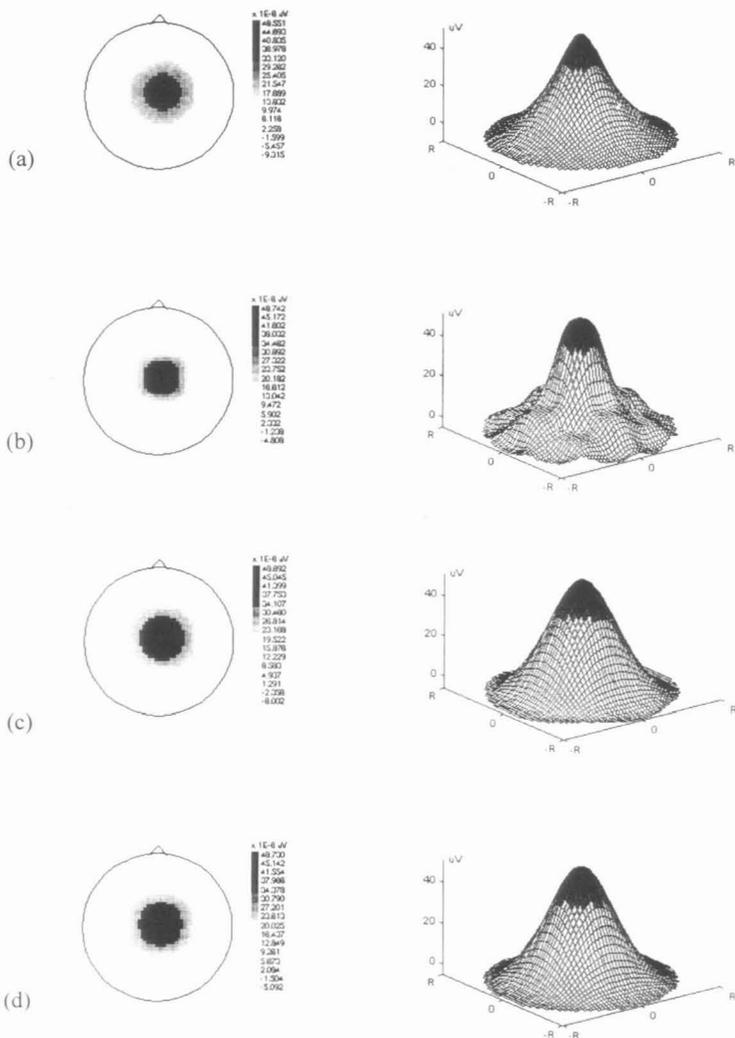


Figura 2 - Mapas topográficos com projeção radial da distribuição de potencial no escalpo (a) gerada por um dipolo de corrente com orientação radial e excentricidade 0,65, localizada imediatamente abaixo de um dos eletrodos da rede *D19* (distribuição original); e estimadas utilizando-se as técnicas: (b) NN de ordem 4; (c) SP de ordem 3; e (d) SS de ordem 3. À direita de cada mapa é apresentada a representação tridimensional da distribuição.

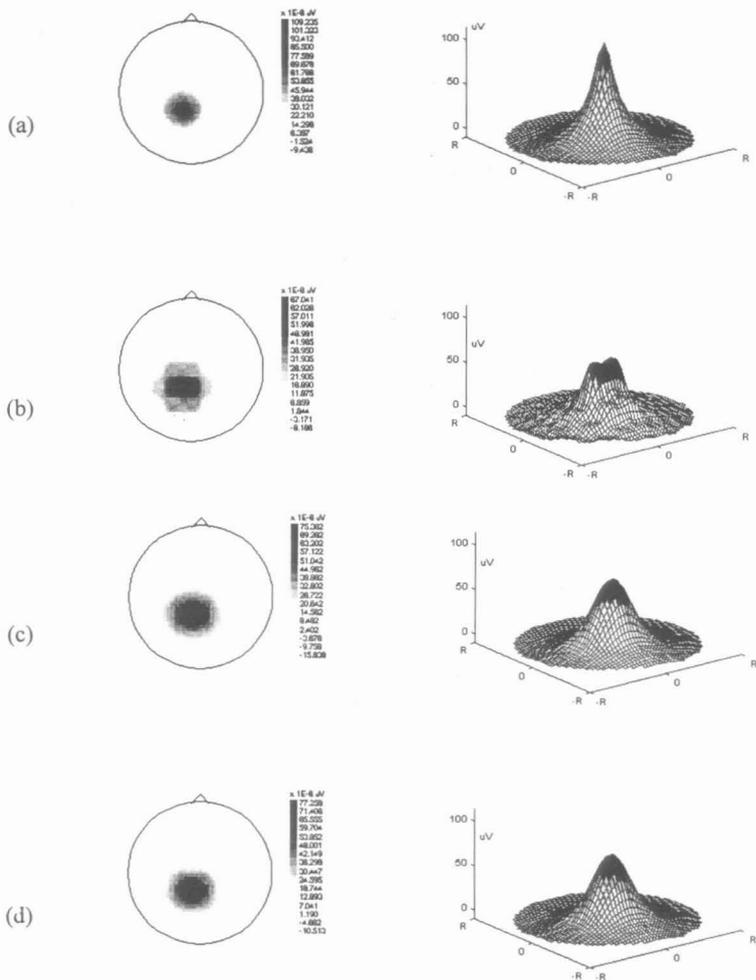


Figura 3 - Mapas topográficos com projeção radial da distribuição de potencial no escalpo (a) gerada por um dipolo de corrente com orientação radial e excentricidade 0,85, localizado no ponto médio da linha imaginária que liga dois eletrodos vizinhos da rede *D64* (distribuição *original*); e estimadas utilizando-se as técnicas: (b) NN de ordem 4; (c) SP de ordem 3; e (d) SS de ordem 3. À direita de cada mapa é apresentada a representação tridimensional da distribuição.

et alii, 1987a). Por outro lado, as técnicas de interpolação *spline*, mostram um único pico, embora tenham também um grande espalhamento em relação à distribuição *original*. Diminuindo-se a resolução espacial para 28 e 19 eletrodos, o espalhamento se torna cada vez maior.

Com o dipolo a uma excentricidade de 0,85 e posicionado de modo que o máximo da distribuição ocorra no centro de um quadrilátero formado por 4 eletrodos vizinhos de *D64* (figura 4), observa-se que todas as técnicas geram um espalhamento maior que o da distribuição *original* e que NN apresenta quatro picos posicionados nos eletrodos vizinhos. Estas características já haviam sido observadas para *D28* e *D19*, porém, gradativamente, com maior espalhamento, evidenciando o quão deficiente pode ser o desempenho destas técnicas.

A figura 5 mostra o resultado das técnicas de interpolação para um dipolo superficial (excentricidade de 0,85) localizado imediatamente abaixo de um eletrodo, para a rede *D28*, na qual se nota a presença de “falsos vales” aparecendo nas distribuições estimadas com as técnicas de interpolação *spline* (figuras 5.c e 5.d). Estes vales também foram encontrados para a resolução *D19*, não ocorrendo, entretanto, para *D64*. Além disso, não são observados para as superfícies resultantes de dipolos da mesma excentricidade quando o máximo está localizado no meio de dois eletrodos ou no centro de 4 eletrodos vizinhos (figura 4). Os resultados mostraram que estes vales apresentam-se mais acentuados quando se aumenta a ordem da técnica. Hassainia *et alii* (1994), também cita a ocorrência de vales quando utiliza redes de 16 ou 19 eletrodos e interpolação *Spline* Esférica, os quais não ocorrem para redes de 31, 41 ou 61 eletrodos. Entretanto, estes autores não identificam a posição relativa entre os dipolos e os eletrodos, mas comentam que estes vales ocorrem em regiões onde não existe alta concentração de eletrodos. A presença desses vales pode ser explicada pela própria definição *Spline*, que gera uma superfície suave passando por todos os potenciais nos eletrodos - de modo a evitar variação abrupta próxima ao máximo; um *overshoot* com formação de vales, em torno do máximo, é produzido.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

As diferentes simulações conduzidas indicam a importância da profundidade da fonte e de sua posição relativa aos eletrodos na avaliação de desempenho das técnicas de interpolação. Com este objetivo, parâmetros globais de inacurácia (*nrν*), precisão (*cv*), e tendência (*rcν*) serão investigados. Os erros de interpolação são quantificados através destas três medidas globais, que se baseiam na diferença entre o valor do modelo e o valor predito por interpolação em cada ponto *i* da rede, sendo $v_o(i)$ o potencial original e $v_p(i)$ o valor estimado por interpolação, pode-se definir o potencial residual $v_r(i)$ como:

$$v_r(i) = v_p(i) - v_o(i). \quad (26)$$

O valor médio quadrático de D_o é definido por:

$$\psi_o^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} v_o^2(i), \quad (27)$$

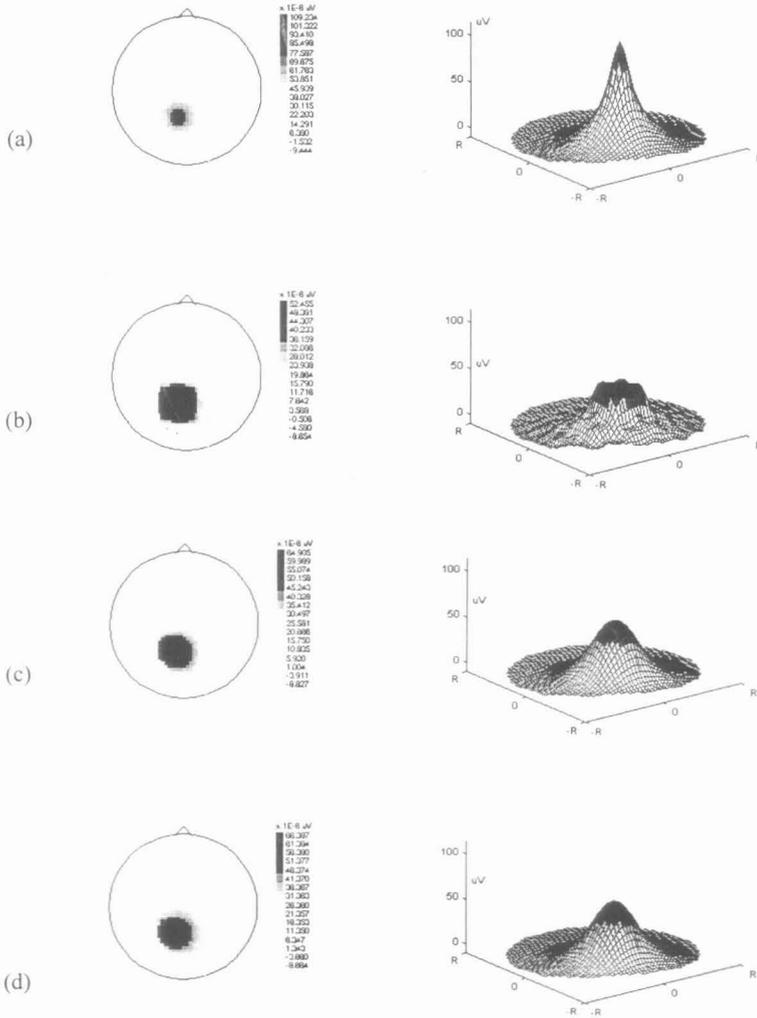


Figura 4 - Mapas topográficos com projeção radial da distribuição de potencial no escalpo (a) gerada por um dipolo de corrente com orientação radial e excentricidade 0,85, localizado no centro de um quadrilátero formado por 4 eletrodos vizinhos da rede *D64* (distribuição *original*); e estimadas utilizando-se as técnicas: (b) NN de ordem 4; (c) SP de ordem 3; e (d) SS de ordem 3. À direita de cada mapa é apresentada a representação tridimensional da distribuição.

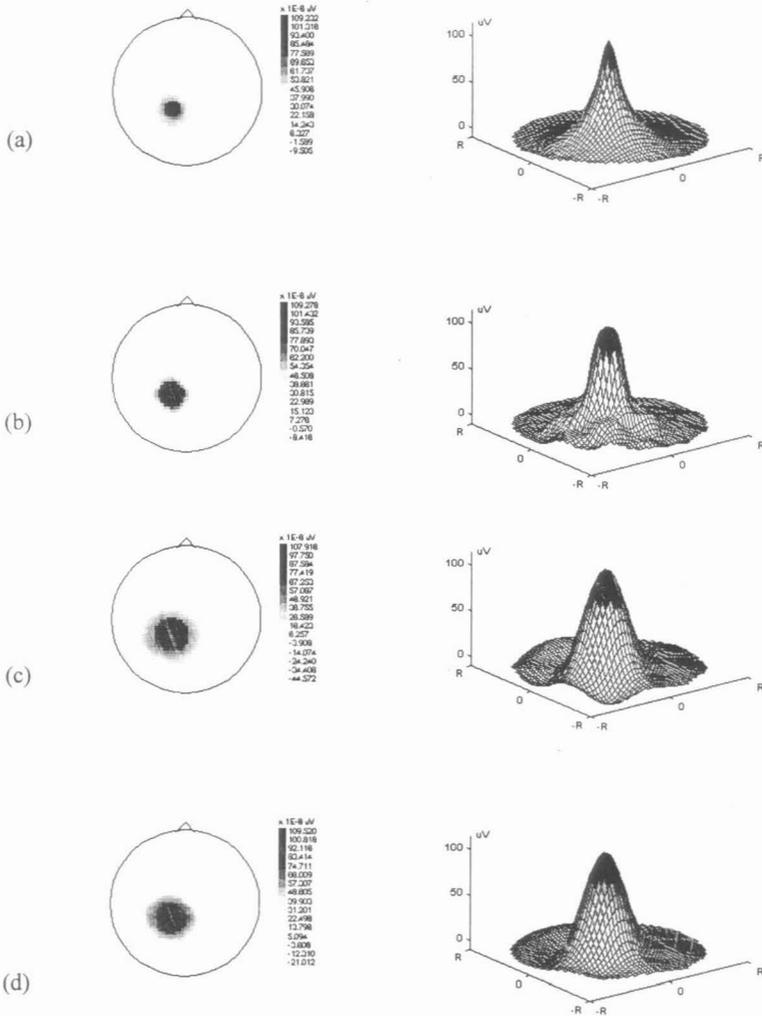


Figura 5 - Mapas topográficos com projeção radial da distribuição de potencial no escalpo (a) gerada por um dipolo de corrente com orientação radial e excentricidade 0,85, localizado imediatamente abaixo de um dos eletrodos da rede *D64* (distribuição *original*); e estimadas utilizando-se as técnicas: (b) NN de ordem 4; (c) SP de ordem 3; e (d) SS de ordem 3. À direita de cada mapa é apresentada a representação tridimensional da distribuição.

onde N_s é o número de pontos. De forma similar, o valor médio quadrático residual é:

$$\psi_r^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} v_r^2(i). \quad (28)$$

A correlação entre o potencial estimado pela interpolação e o original é dada por:

$$\rho_{po}^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} v_p(i) \cdot v_o(i) \quad (29)$$

e a correlação entre o potencial residual e o potencial original por:

$$\rho_{ro}^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} v_r(i) \cdot v_o(i). \quad (30)$$

Assim, o valor médio quadrático residual normalizado (nrv) pode ser obtido como:

$$nrv = \frac{\psi_r^2}{\psi_o^2}. \quad (31)$$

onde nrv é uma medida da inacurácia do interpolador, pois inclui o erro de tendência e a variância. Soong *et alii* (1993) explicam este parâmetro como a variância da parte do potencial que não é resultante da técnica de interpolação. O valor de nrv para um interpolador perfeitamente acurado deve ser, portanto, igual a zero.

A precisão do interpolador pode ser medida por cv , definida como:

$$cv = \frac{\rho_{po}^2}{\sqrt{\psi_p^2 \cdot \psi_o^2}}, \quad (32)$$

pois descreve o quanto a morfologia da distribuição de potencial estimada pela interpolação se correlaciona com a da distribuição de potencial original. Para um interpolador preciso, $cv = 1$.

Como medida de correlação entre o potencial residual e o potencial original, tem-se:

$$rcv = \frac{\rho_{ro}^2}{\sqrt{\psi_r^2 \cdot \psi_o^2}}, \quad (33)$$

onde rcv indica se a técnica de interpolação consistentemente superestima ou subestima a distribuição de potencial original modelo, sendo, portanto, considerada uma medida de tendência. Um valor negativo de rcv indica subestimação e, um valor positivo, superestimação. Para um interpolador ideal, $rcv = 0$.

A influência da localização da fonte no mapeamento topográfico foi investigada de duas maneiras distintas: i) profundidade do dipolo, que influencia na suavidade da distribuição de potencial gerada no escalpo; ii) sua localização em relação aos eletrodos, que altera a localização do máximo da distribuição. O efeito da profundidade do dipolo foi investigado para excentricidades variando de 0,65 a 0,85.

No que concerne à localização espacial do dipolo em relação à posição dos eletrodos, independentemente da densidade de eletrodos em estudo (19, 28 ou 64), 16 possíveis situações foram consideradas, conforme figura 6. Tomando-se quaisquer quatro eletrodos vizinhos, formando um quadrilátero, o dipolo foi localizado em uma das posições marcadas com "x", na qual destacam-se as posições relativas A - imediatamente abaixo de um eletrodo de captação, B - ponto médio entre dois eletrodos vizinhos e C - centro do quadrilátero formado por quatro eletrodos vizinhos.

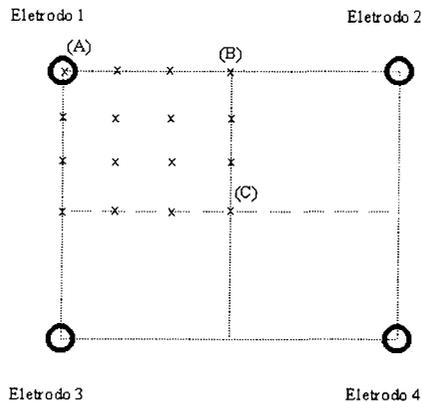


Figura 6. Esquema representando as 16 posições (x) para o dipolo radial, destacando-se: A - embaixo de um eletrodo, B - ponto médio entre dois eletrodos vizinhos e C - centro do quadrilátero formado por 4 eletrodos vizinhos.

Considerando-se uma dada excentricidade, os parâmetros de desempenho foram calculados com o dipolo em cada uma destas 16 posições, sendo então calculados os parâmetros espaciais médios (inacurácia média espacial, precisão média espacial, tendência média espacial) como a média destes 16 valores. (Por simetria, fontes nos outros quadrantes conduziram a resultados equivalentes). Para estimar o desempenho das técnicas de interpolação para dipolos localizados em qualquer profundidade (faixa proposta por Ary *et alii*, 1981) e posição espacial, definiu-se cada parâmetro global como a média dos respectivos parâmetros espaciais médios.

Inicialmente, foi investigado como a inacurácia (nrv) varia com a excentricidade do dipolo e com a ordem da técnica de interpolação. Para a resolução $D28$ e dipolo localizado abaixo do eletrodo, na posição relativa A (figura 7), a nrv de todas as técnicas piora com o aumento da excentricidade, exceto para a NN de ordem $m = 3$, que tem uma ligeira melhora de desempenho para excentricidades até aproximadamente 0,8 (figura 7.a). A melhor ordem da técnica NN é com $m = 3$, enquanto que a melhor ordem para SP (figura 7.b) e SS (figura 7.c) é $m = 2$. Na figura 7.d, comparando-se as melhores ordens para cada técnica, observa-se uma inversão no desempenho relativo entre as técnicas *spline* e a NN: para excentricidades menores que 0,8 as técnicas SP e SS têm um melhor desempenho que NN, sendo superadas por esta para dipolos superficiais (excentricidade $> 0,8$). Para resolução de 19 e 64 eletrodos e dipolo na posição A, nrv comportou-se de maneira similar, porém para a maior densidade de eletrodos a inacurácia parece ser menos dependente da ordem da interpolação. Desempenho semelhante também foi verificado para os parâmetros precisão (cv) e tendência (rcv).

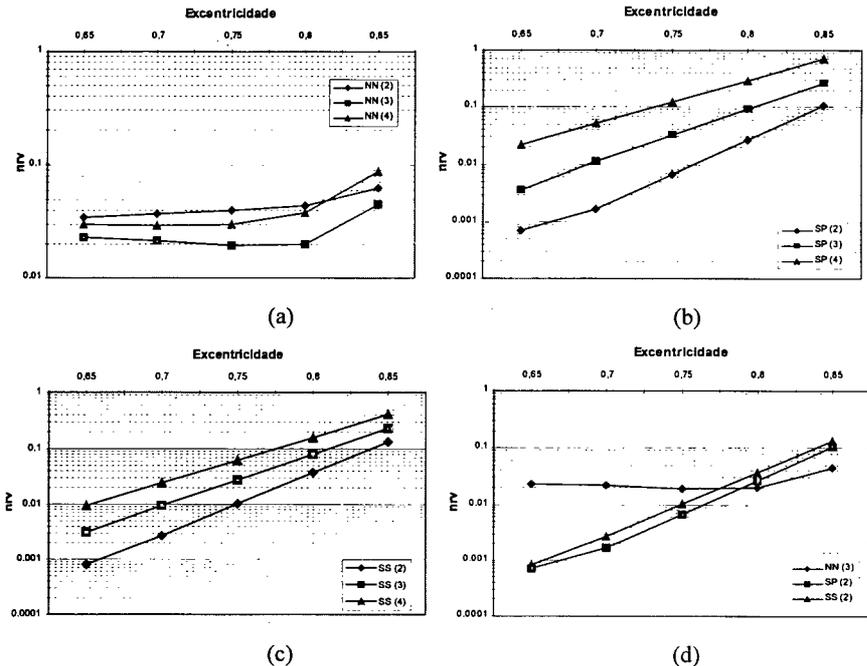


Figura 7: Variação da inacurácia (nrv) com a excentricidade do dipolo radial, localizado imediatamente abaixo de um dos eletrodos (posição relativa A), e com a ordem da técnica de interpolação, estimadas a partir de $D28$: (a) NN, (b) SP; (c) SS; e (d) melhor ordem para cada técnica.

Para um dipolo localizado no centro do quadrilátero formado por quatro eletrodos vizinhos (posição relativa C), e para $D28$, nrv aumenta quase exponencialmente com a excentricidade (figura 8). A comparação da melhor ordem para cada técnica de interpolação (figura 8.d) indica que o melhor desempenho ocorre com SS de ordem $m = 4$ e, logo a seguir, com SP de ordem $m = 3$, ambas bem superiores a NN para $m = 3$. Diferentemente da figura anterior, as técnicas *Spline* têm, de forma consistente, um desempenho melhor que a NN, sendo, neste caso, a esférica é a mais adequada. Alterando-se a densidade de eletrodos e investigando-se outros parâmetros de desempenho, resultados parecidos foram obtidos.

Os resultados indicam que não é possível generalizar qual técnica de interpolação é a mais adequada (inclusive, quanto à escolha da melhor ordem), pois o desempenho varia com a excentricidade e com a posição relativa da fonte (dipolo). Assim, o desempenho médio de cada técnica foi investigado através do cálculo dos parâmetros médios, primeiro calculando-se a média sobre as 16 posições a cada excentricidade, e, em seguida, a média global.

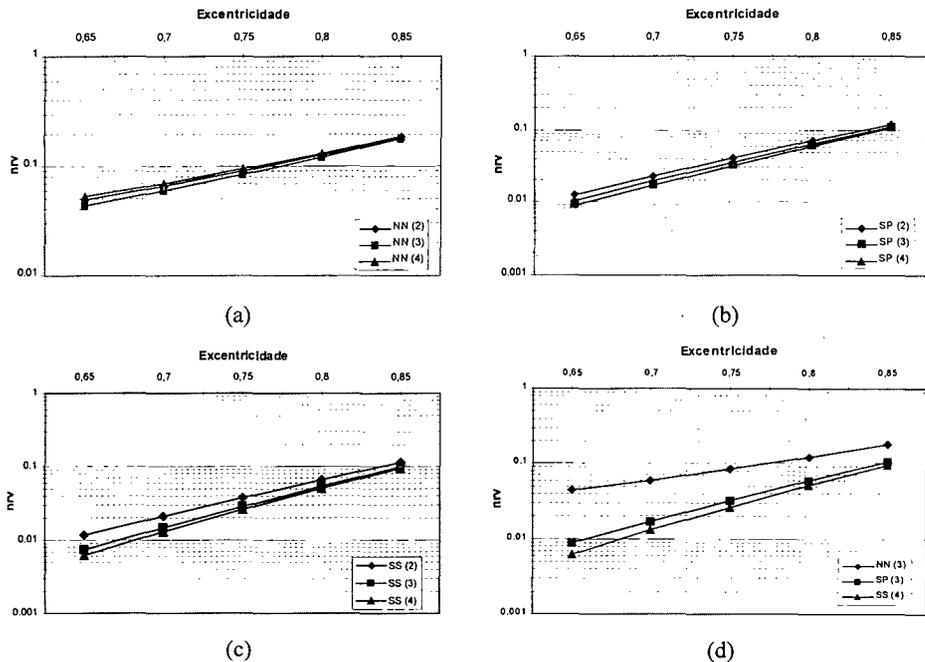


Figura 8 - Variação da inaccuracy (nrv) com a excentricidade do dipolo radial, localizado no centro do quadrilátero formado por quatro eletrodos vizinhos (posição relativa C), e com a ordem da técnica de interpolação, estimadas a partir de $D28$: (a) NN; (b) SP; (c) SS; e (d) melhor ordem para cada técnica.

Para *D28* os parâmetros médios espaciais *nrv* e *cv* (figuras 9 e 10) indicam um melhor desempenho da ordem 3 para a técnica NN. Para a técnica SP e SS ocorre que, para dipolos profundos (excentricidade < 0,7), a melhor ordem é 3, e para dipolos superficiais é 2. Comparando-se as técnicas entre si (figuras 8.d e 9.d), nota-se que a SS de ordem 3 apresenta desempenho ligeiramente superior a técnica SP e muito superior a NN, em particular para dipolos profundos (excentricidades < 0,8).

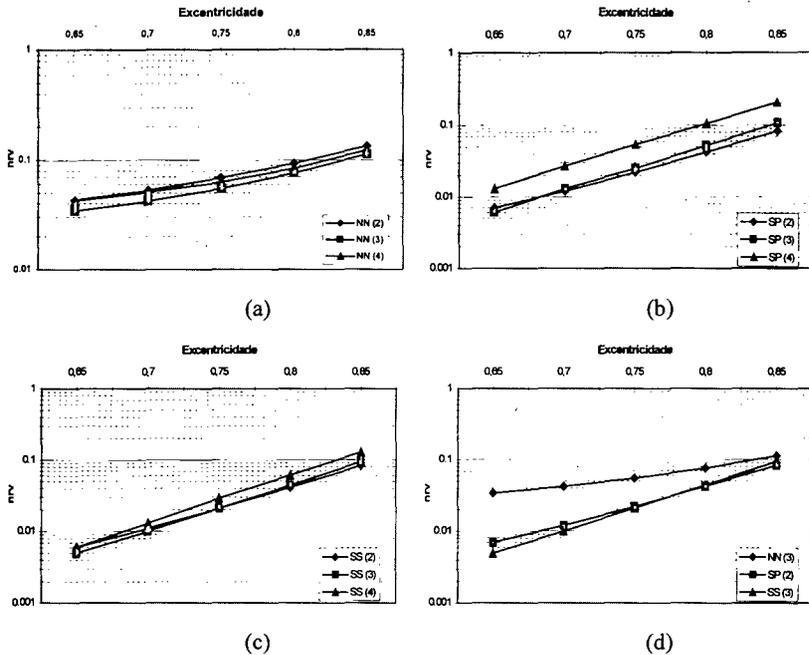


Figura 9 - Variação da inacurácia espacial média (*nrv*) com a excentricidade do dipolo radial e com a ordem da técnica de interpolação, estimadas a partir de *D28*: (a) NN; (b) SP; (c) SS; (d) melhor ordem para cada técnica.

O desempenho médio global da técnica NN para as diferentes densidades de eletrodos em estudo, é mostrado na Tabela 1, onde se nota que a ordem 3 apresenta os melhores resultados para a inacurácia (*nrv*) e para a precisão (*cv*). Por outro lado, a tendência (*rcv*) melhora consistentemente com o aumento da ordem, sendo que os valores negativos indicam que a técnica tende a subestimar a distribuição original. Pode-se verificar a sensível melhora de todos os parâmetros com o aumento do número de eletrodos. Se esta subestimação indicada não for relevante, deve-se utilizar a ordem 3

para NN. De um modo geral, existe uma sensível melhora no desempenho da técnica NN com o aumento do número de eletrodos.

Tabela 1 - Desempenho médio da técnica de interpolação 4-vizinhos (NN) na construção de mapas topográficos para 64 dipolos com orientação radial, localizados a diferentes profundidades e em diferentes posições relativas aos eletrodos, para amostragens espaciais de 19, 28 e 64 eletrodos (melhores valores indicados em negrito).

Mapa	19 eletrodos			28 eletrodos			64 eletrodos		
	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>
NN 2	0,181	0,939	-0,797	0,079	0,966	-0,578	0,027	0,989	-0,577
NN 3	0,148	0,942	-0,640	0,064	0,970	-0,440	0,019	0,992	-0,512
NN 4	0,156	0,931	-0,499	0,073	0,964	-0,309	0,023	0,989	-0,366

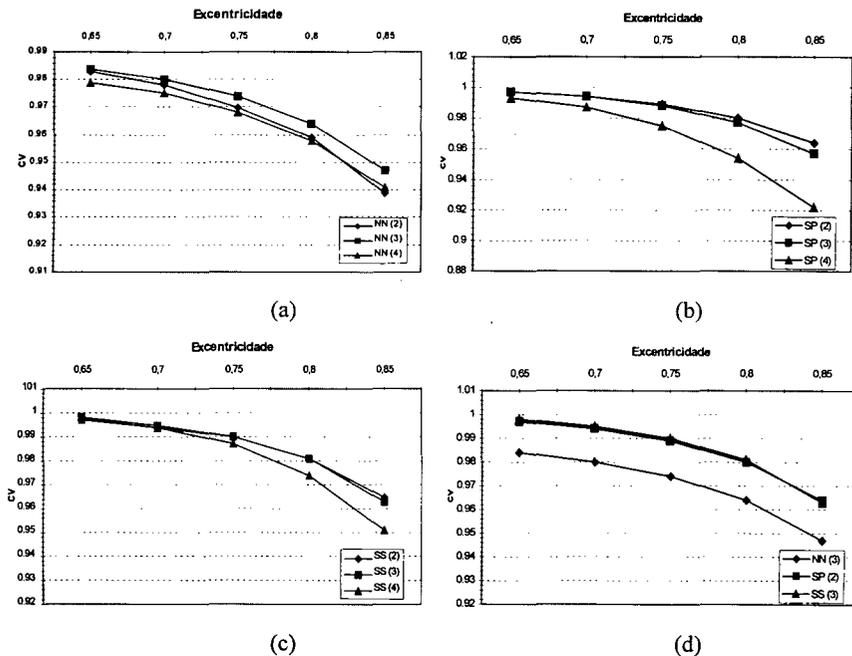


Figura 10 - Variação da precisão espacial média (*cv*) com a excentricidade do dipolo de radial e com a ordem da técnica de interpolação, estimadas a partir de *D28*: (a) NN; (b) SP; (c) SS; e (d) melhor ordem para cada técnica.

Considerando-se a técnica SP (Tabela 2), independente da densidade de eletrodos, a inacurácia global (*nrv*) e a precisão global (*cv*) pioram com o aumento da ordem, sendo a ordem 2 a que apresenta os melhores resultados. Todavia, a tendência (*rcv*) aponta para a ordem 3. Similarmente à NN, a distribuição interpolada tende a subestimar a *original*. Se esta subestimação não for relevante, a ordem 2 parece ser a mais adequada para a SP.

Tabela 2 - Desempenho médio da técnica de interpolação *Spline* Plana (SP) na construção de mapas topográficos para 64 dipolos com orientação radial, localizados a diferentes profundidades e em diferentes posições relativas aos eletrodos, para amostragens espaciais de 19, 28 e 64 eletrodos (melhores valores indicados em negrito).

Mapa	19 eletrodos			28 eletrodos			64 eletrodos		
	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>
SP 2	0,103	0,959	-0,303	0,033	0,985	-0,114	0,007	0,997	-0,131
SP 3	0,130	0,953	-0,167	0,040	0,983	-0,087	0,007	0,997	-0,042
SP 4	0,175	0,940	-0,113	0,081	0,966	-0,163	0,008	0,997	-0,044

Para a técnica SS (Tabela 3), não há uma grande diferença no desempenho médio quando se altera a ordem do modelo. Segundo os parâmetros *nrv* e *cv*, a ordem 2 apresenta resultados ligeiramente superiores, enquanto que a tendência (*rcv*) indica ordem 4 para 19 eletrodos, ordem 2 para 28 eletrodos, e, para 64 eletrodos, todas as ordens têm praticamente o mesmo desempenho. De forma geral, pode-se optar pela ordem 2 ou 3, descartando-se a ordem 4, que, para 28, exhibe resultados inferiores às demais.

Tabela 3 - Desempenho médio da técnica de interpolação *Spline* Esférica (SS) na construção de mapas topográficos para 64 dipolos com orientação radial, localizados a diferentes profundidades e em diferentes posições relativas aos eletrodos, para amostragens espaciais de 19, 28 e 64 eletrodos (melhores valores indicados em negrito).

Mapa	19 eletrodos			28 eletrodos			64 eletrodos		
	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>	<i>nrv</i>	<i>cv</i>	<i>rcv</i>
SS 2	0,102	0,960	-0,281	0,033	0,986	-0,065	0,007	0,997	-0,033
SS 3	0,108	0,961	-0,192	0,035	0,986	-0,092	0,007	0,997	-0,032
SS 4	0,110	0,961	-0,167	0,048	0,981	-0,156	0,007	0,997	-0,034

DISCUSSÃO

Utilizando-se distribuições de potencial simuladas, os resultados indicam a dependência do desempenho das técnicas de interpolação com a posição do dipolo e com o número de eletrodos (resolução espacial). De modo geral, a inacurácia (*nr_v*), precisão (*cv*) e tendência (*rcv*) pioram com o aumento da excentricidade do dipolo (dipolos mais superficiais). Alterando-se a posição relativa entre o dipolo e a rede de eletrodos utilizada na interpolação, estes parâmetros globais variam diferentemente, dependendo da técnica empregada. Para dipolos superficiais, não localizados em posição próxima a um dado eletrodo, as técnicas *Spline* Plana e Esférica apresentam desempenho superior ao da técnica de interpolação 4-vizinhos. Porém, quando o máximo da distribuição ocorre próximo, ou imediatamente abaixo, de um eletrodo, a técnica 4-vizinhos apresenta desempenho superior.

Embora o número de eletrodos a ser utilizado dependa do protocolo experimental e do equipamento disponível, os resultados confirmam o esperado: quanto maior a resolução espacial na coleta dos dados, menor o erro de interpolação. Utilizando redes de 64 eletrodos, a inacurácia e a precisão das técnicas se tornam menos sensíveis à variação da posição e da profundidade da fonte, sugerindo ser menos crítica a escolha do método de interpolação. Entretanto, com redes de 19 e 28 eletrodos, notam-se sensíveis diferenças nos desempenhos com a variação da posição do dipolo.

Comparando-se as técnicas de interpolação *Spline*, observa-se que estas se comportam de maneira muito similar quanto as diferentes posições e profundidade do dipolo, com uma ligeira superioridade para a *Spline* Esférica. O fraco desempenho destas técnicas para fontes superficiais próximas a um eletrodo de captação (inclusive com o aparecimento de “falsos vales”), evidencia uma situação crítica que pode confundir a interpretação da localização e da orientação da fonte. Diferentemente, para fontes mais distantes dos eletrodos, a técnica 4-vizinhos, além de não identificar a localização do máximo da atividade, pode ocasionar erros na interpretação quanto ao número de fontes.

Os melhores resultados médios globais para todos os parâmetros foram obtidos para SS, seguindo-se pela SP e, por último, NN, em conformidade com Soong *et alii* (1993), Perrin *et alii* (1987a), Perrin *et alii*. (1989). Porém, para fontes superficiais próximas a um eletrodo de captação as técnicas *Spline* têm uma sensível queda de desempenho, com o aparecimento de falsos vales, que também foram encontrados no trabalho de Hassainia *et alii*. (1991). Nesta situação particular, o desempenho da técnica 4-vizinhos é superior ao das técnicas *Splines*.

Quanto à ordem das técnicas, utilizando distribuições simuladas e densidades de eletrodos de 19 e 41, Perrin *et alii* (1987a) encontraram resultados similares aos deste trabalho comparando a técnica 4-vizinhos à *Spline* Planar. Assim, também sugerem a ordem 2 para a *Spline* Plana e a ordem 3 para a 4-vizinhos, sendo a *Spline* a de melhor desempenho, apesar dos autores não identificarem a localização das fontes em relação à rede de eletrodos. Para a técnica *Spline* Esférica, Perrin *et alii* (1989), utilizando 19 eletrodos e o operador Laplaciano sugerem a ordem 4 como a de melhor desempenho, enquanto que neste trabalho existe uma ligeira superioridade das ordens 2 ou 3, embora no atual trabalho não se tenha investigado esta técnica em conjunto com o operador Laplaciano.

Resultado distinto do aqui encontrado para a ordem da técnica NN e do desempenho desta com relação as *Splines* são relatados por Soong *et alii* (1993), em trabalho desenvolvido com sinais EEG (portanto, sem conhecimento exato das fontes corticais) e 31 eletrodos. Estes autores indicam a NN de ordem 2 como a de melhor desempenho, sendo porém bem inferior às *Splines*. Isto provavelmente se deve à diferença de metodologia adotada, que estima o valor do potencial em um eletrodo somente a partir dos valores de outros eletrodos, penalizando a técnica de interpolação local ao aumentar a distância entre este ponto e os eletrodos vizinhos. As técnicas *Spline*, por serem globais (utilizam todos os eletrodos), são menos afetadas por este procedimento.

CONCLUSÕES

A avaliação de desempenho de técnicas de interpolação, aplicadas ao mapeamento cerebral (NN, SP e/ou SS), tem sido efetuada por diversos pesquisadores, utilizando dados simulados ou sinais EEG e diferentes densidades de eletrodos, além de variar a profundidade da fonte (somente possível em simulação). Neste trabalho, de forma sistemática, também foram considerados a posição relativa da fonte para diferentes redes de eletrodos e os parâmetros inacurácia, precisão e tendência, que permitiram estabelecer a ordem mais adequada para cada uma das técnicas de interpolação em estudo. Tanto a técnica de interpolação mais adequada, quanto sua ordem, ainda não são consensuais na literatura, conforme se pode depreender dos resultados de Soufflet *et alii* (1991), Perrin *e alii* (1987a, 1987b e 1989) e Soong *et alii* (1993). Assim, diferentemente destes autores, os parâmetros médios globais de desempenho (média dos parâmetros de desempenho para dipolos com diferentes profundidades e posição relativa aos eletrodos), em particular a inacurácia e a precisão, indicam a *Spline* Esférica de ordem 2 ou 3 como a mais adequada técnica de interpolação, independentemente da resolução espacial. Além disso, sugerem as ordens 3 e 2, respectivamente, para as técnicas 4-vizinhos e *Spline* Plana.

Na prática clínica, embora não adequado, é usual a utilização de sistemas com baixo número de eletrodos (por exemplo, 19 canais do sistema internacional 10-20) para construção de mapas topográficos da distribuição de potencial no escalpo. Nestes casos, baseado nos resultados com distribuições simuladas, é aconselhável o emprego da técnica de interpolação *Spline* Esférica de ordem 2 ou 3. As outras técnicas de interpolação (4-vizinhos e *Spline* Plana, com ordem 3 e 2, respectivamente) também poderiam ser usadas para dirimir dúvida quanto a situações críticas na utilização da *Spline* Esférica. Logo, é fundamental que o profissional envolvido na interpretação de mapas topográficos cerebrais conheça as limitações das diferentes técnicas de interpolação utilizadas.

Finalmente, os resultados sugerem que, em havendo uma região anatômica específica de interesse para a construção do mapa, mesmo com equipamentos de reduzido número de canais, deve-se concentrar os eletrodos nesta região, diminuindo-se, assim, a distância inter-eletrodos e tornando a técnica de interpolação adotada menos crítica no mapeamento cerebral.

AGRADECIMENTOS

Às agências CAPES, CNPq e PRONEX/MCT pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARY, J. P., KLEIN, S. A. and FENDER, D. H. (1981). "Location of Sources of Evoked Scalp Potentials: Corrections for Skull and Scalp Thicknesses". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 28, n. 6, p. 447-552.
- BABILONI, F., BABILONI, C., CECCHI, L., ONORATI, P., SALINARI, S. and URBANO, A. (1994). "Statistical Analysis of Topographic Maps of Short-Latency Somatosensory Evoked Potentials in Normal and Parkinsonian Subjects". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 41, n. 7, p. 617-624.
- BUCHSBAUM, M. S., RIGAL, F., COPPOLA, R., CAPPELETTI, J., KING, C. and JOHNSON, J. (1982). "A New System for Gray-Level Surface Distribution Maps of Electrical Activity". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 53, n. 2, p. 237-242.
- BURGESS, A. and GRUZELIER, J. (1993). "Localisation of Cerebral Function Using Topographical Mapping of EEG: A Preliminary Validation Study". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 87, n. 4, p. 254-257.
- CARREÑO-RIMAUDO, S. del V. and INFANTOSI, A. F. C. (1994). "Topographic Mapping of the Visual Evoked Potential after Source Derivation". *Medical Progress Through Technology*, v. 20, n.1-2, p. 5-13.
- CURRAN, T., TUCKER, D. M., KUTAS, M. and POSNER, M. I. (1993). "Topography of the N400: Brain Electrical Activity Reflecting Semantic Expectancy". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 88, n. 3, p. 188-209.
- DUFFY, F. H., HUGHES, J. R., MIRANDA, F., BERNAD, P. and COOK, P. (1994). "Status of Quantitative EEG (QEEG) in Clinical Practice". *Clinical Electroencephalography*, v. 25, n. 4, p. VI-XXII.
- GEVINS, A., SMITH, M. E., McEVOY, L. and YU, D. (1997). "High-Resolution EEG Mapping of Cortical Activation Related to Working Memory: Effects of Task Difficulty, Type of Processing, and Practice". *Cerebral Cortex*, v. 7, n. 4, p. 374-385.
- GEVINS, A., LEONG, H., SMITH, M. E., LE, J. and DU, R. (1995). "Mapping Cognitive Brain Function with Modern High-Resolution Electroencephalography". *Trends in Neurosciences*, v. 18, n.10, p. 429-436.
- GEVINS, A., LE, J., MARTIN, N. K., BRICKETT, P., DESMOND, J. and REUTTER, B. (1994). "High Resolution EEG: 124-Channel Recording, Spatial Deblurring and MRI Integration Methods". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 90, n. 5, p. 337-358.
- HARDER, R. L. and DESMARAIS, R. N. (1972). "Interpolation Using Surface Splines". *Journal of Aircraft*, v. 9, p. 189-191.

- HARMONY, T., FERNANDEZ-BOUZAS, A. F., MAROSI, E., FERNANDEZ, T., BERNAL, J., RODRIGUEZ, M., REYES, A., SILVA, J., ALONSO, M. and CASIAN, G. (1993). "Correlation Between Computed Tomography and Voltage and Current Source Density Spectral EEG Parameters in Patients with Brain Lesions". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 87, n. 4, p. 196-205.
- HARNER, R. N. (1988). "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*. Eds.: D. Samson-Dolfus, J. D. Guieu, J. Gotman and P. Etevenon. Rouen. p. 49-61, 6-9 Mar.
- HASSAINIA, F., MEDINA, V., DONADEY, A. and LANGEVIN, F. (1994). "Scalp Current Density Mapping With an Enhanced Spherical Spline Interpolation". *Medical Progress Through Technology*, v. 20, n. 1-2, p. 23-30.
- HJORTH, B. (1975). "An On-Line Transformation of EEG Scalp Potentials into Orthogonal Source Derivations". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 39, n. 5, p. 526-530.
- INOUE, T., SHINOSAKI, K., IYAMA, A. and MATSUMOTO, Y. (1993). "Localization of Activated Areas and Directional EEG Patterns During Mental Arithmetic". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 86, n. 4, p. 224-230.
- LIBERATI, D., DICORRADO, S. and MANDELLI, S. (1992). "Topographic Mapping of Single Sweep Evoked Potentials in the Brain". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 39, n. 9, p.943-951.
- LOPES DA SILVA, F. H. (1993). "Computer - Assisted EEG Diagnosis: Pattern Recognition and Brain Mapping". In: *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields*. Eds.: E. Niedermeyer and F. H. Lopes da Silva, Baltimore: Williams and Wilkins, Third edition, p. 1063-1086.
- NUNEZ, P. L. (1995). "Methods to Improve Spatial Resolution". In: *Neocortical Dynamics and Human EEG Rhythms*. Ed.: P. L. Nunez. New York: Oxford University Press, p. 54-57.
- PERRIN, F., PERNIER, J., BERTRAND, O. and ECHALLIER, J. F. (1989). "Spherical Splines for Scalp Potential and Current Density Mapping". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 72, n. 2, p. 184-187.
- PERRIN, F., PERNIER, J., BERTRAND, O., GIARD, M.H. and ECHALLIER, J. F. (1987a). "Mapping of Scalp Potentials by Surface Spline Interpolation". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 66, n. 1, p. 75-81.
- PERRIN, F., BERTRAND, O. and PERNIER, J. (1987b). "Scalp Current Density Mapping: Value and Estimation from Potential Data". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 34, n. 4, p. 283-288.

- RUSH, S. and DRISCOLL, D. A. (1969). "EEG Electrode Sensitivity - An Application of Reciprocity". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 16, n. 1, p.15-22.
- SOONG, A. C. K., LIND, J. C., SHAW, G. R. and KOLES, Z. J. (1993). "Systematic Comparisons of Interpolation Techniques in Topographic Brain Mapping". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v.87, n. 4, p. 185-195.
- SOUFFLET, L., TOUSSAINT, M., LUTHRINGER, R., GRESSER, J., MINOT, R. and MACHER, J. P. (1991). "A Statistical Evaluation of the Main Interpolation Methods Applied to 3-Dimensional EEG Mapping". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 79, n. 5, p. 393-402.
- TIERRA-CRIOLLO, C. J. (1993). *Derivação da Fonte com Modelo Esférico da Cabeça: Aplicação no Mapeamento da Atividade Elétrica Cerebral*. Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 145 p., abr.
- VANDESTEENE, A., MAVROUDAKIS, N., DEFEVRIMONT, M., BRUNKO, E. and ZEGERS de BEYL, D. (1993). "Topographic Analysis of the Effects of Isoflurance Anesthesia on SEP". *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 8, n. 1, p. 77-81.
- VAIDYANATHAN, C. and BUCKLEY, K. (1997). "A Sampling Theorem for EEG Electrode Configuration". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 40, n. 1, p. 94-97.
- WAHBA, G. (1981). "Spline Interpolation and Smoothing on the Sphere". *SIAM Journal of Scientific Computation*. v. 2, p. 5-16.

PERFORMANCE EVALUATION OF INTERPOLATION TECHNIQUES FOR BRAIN MAPPING USING SIMULATIONS

A.F.C. Infantosi¹, J.L. Silva Jr.², C.J. Tierra-Criollo³ e D.M. Simpson⁴

ABSTRACT - In order to evaluate the performance of three interpolation techniques commonly used for Topographic Brain Maps (4-Nearest Neighbours, Planar Spline and Spherical Spline), potential distributions on the scalp were simulated, using current dipoles in a model of the head formed by three inhomogeneous concentric shells. These potentials were spatially sampled using 19, 28 and 64 electrodes, and topographic brain maps were then constructed. Errors between simulated and interpolated potentials were analysed by visual inspections and by three global numerical parameters, which quantify inaccuracy, precision and bias. The results showed that the performance of each interpolation technique depends both on the depth of the dipole and its position relative to the electrodes. The 4-Nearest Neighbour technique performed better than Splines for dipoles near an electrode, and Splines were better for dipoles distant from electrodes. From the mean values of the parameters for different dipole positions a slight superiority of the Spherical Spline over Planar Spline was found, and both performed better than the 4-Nearest Neighbours technique. The best order for Planar Spline and the 4-Nearest Neighbours was three and two, respectively, whereas for Spherical Spline, orders two and three performed similarly. The study showed clearly the importance of understanding the conditions that affect the performance of the interpolation techniques, in order to avoid errors in interpreting topographic brains maps.

Keywords: Quantitative EEG, Brain mapping, Interpolation techniques

¹ Professor, Biomedical Engineering Program, COPPE/UFRJ, E-mail: afci@peb.ufrj.br, P.O. Box 68510, 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ

² M.Sc. in Biomedical Engineering, COPPE/UFRJ

³ Doutorate Student, Biomedical Engineering Program, COPPE/UFRJ, E-mail: carjulio@peb.ufrj.br

⁴ Associate Professor, Biomedical Engineering Program, COPPE/UFRJ, E-mail: david@peb.ufrj.br