



Determinação do arcabouço de fontes magnéticas simples através do algoritmo genético

Cosme F. Ponte-Neto (cosme@on.br), Valéria C.F. Barbosa (valcris@on.br), Israel N.Almeida-Junior (israel@on.br).

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

We present a method for inverting total-field anomaly for determining the framework of 3D magnetic sources such as: batholiths, dikes, sills, geological contacts, kimberlite and lamproite pipes. We use genetic algorithm to obtain magnetic sources' frameworks and their magnetic features simultaneously. Specifically, we estimate the magnetization direction (inclination and declination), the total dipole moment intensity, and the horizontal and vertical positions, in Cartesian coordinates, of a finite set of elementary magnetic dipoles. The spacial distribution of these magnetic dipoles makes up the skeletal outlines of 3D geologic sources.

Introdução

Neste método, estimamos as coordenadas Cartesianas (x , y , z) de um conjunto de dipolos magnéticos elementares cuja distribuição espacial forma o esqueleto de um corpo magnético. O método fornece também uma única direção de magnetização (declinação e inclinação) e uma estimativa aproximada do momento de dipolo magnético do corpo. Para tanto, estabelecemos o problema vinculado de minimizar um funcional estabilizante que favoreça a condição de proximidade entre os dipolos sujeito a explicar a anomalia magnética de campo total, dentro de uma precisão imposta pelo erro experimental. Neste trabalho, este problema inverso vinculado não linear é resolvido através de um algoritmo genético (AG).

Metodologia

Seja uma fonte geológica 3D magnetizada uniformemente com geometria arbitrária produzindo um conjunto de N observações da anomalia de campo total

$\mathbf{b}^0 \equiv [b_1^0, \dots, b_N^0]^T$. Para estimarmos o esqueleto

desta fonte 3D a partir de \mathbf{b}^0 , assumimos um conjunto de M dipolos magnéticos com a mesma direção de magnetização e com o mesmo momento do dipolo magnético. O j -ésimo dipolo está localizado nas coordenadas Cartesianas (x'_j, y'_j, z'_j) , $j = 1, \dots, M$, conforme a Figura 1. O campo magnético teórico, devido aos M dipolos, calculado na k -ésima (x_k, y_k, z_k) observação,

adicionado o campo geomagnético regional, é dado pela equação 1.

$$b_k = \left[\left(\sum_{j=1}^M bx_j + Fx \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^M by_j + Fy \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^M bz_j + Fz \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Sendo,

$$bx_j = \frac{\mu_0 \cdot m_0 \cdot (3 \cdot \omega \cdot (x_k - x'_j) - r^2 \cdot l)}{r^5}$$

$$by_j = \frac{\mu_0 \cdot m_0 \cdot (3 \cdot \omega \cdot (y_k - y'_j) - r^2 \cdot m)}{r^5}$$

$$bz_j = \frac{\mu_0 \cdot m_0 \cdot (3 \cdot \omega \cdot (z_k - z'_j) - r^2 \cdot n)}{r^5}$$

e

$$r = \left((x_k - x'_j)^2 + (y_k - y'_j)^2 + (z_k - z'_j)^2 \right)^{1/2}$$

$$\omega = (x_k - x'_j) \cdot l + (y_k - y'_j) \cdot m + (z_k - z'_j) \cdot n$$

$$Fx = F \cdot L$$

$$Fy = F \cdot M$$

$$Fz = F \cdot N \quad ,$$

em que m_0 é a intensidade do momento de dipolo, $L = \cos(I) \cdot \cos(D)$, $M = \cos(I) \cdot \sin(D)$, $N = \sin(I)$ e $l = \cos(i)$, $m = \cos(i) \cdot \sin(d)$, $n = \sin(i)$ com I , D e F sendo, respectivamente a inclinação, declinação e intensidade do campo geomagnético; enquanto i e d são, respectivamente a inclinação e a declinação da magnetização da fonte (Blakely, 1995).

Neste trabalho, vamos estimar a direção de magnetização (i e d), a intensidade de dipolo magnético (m_0), e as posições horizontais e verticais (x'_j, y'_j, z'_j) , $j = 1, \dots, M$ dos M dipolos magnéticos elementares. Para tanto, estimamos o vetor $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{3M+3}$ minimizando

$$\phi = \sum_{k=1}^N |b_k^0 - b_k(\mathbf{q})| + \lambda \cdot \delta(\mathbf{p}), \quad (2)$$

em que

$$\delta(\mathbf{p}) = \sum_{j=2}^{M-1} |d_{j-1,j} - d_{j,j-1}| \quad (3)$$

O vetor \mathbf{q} pode ser escrito de forma particionada, como

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}$$

sendo $\mathbf{p} = [x'_1, y'_1, z'_1, \dots, x'_M, y'_M, z'_M]^T$ e $\mathbf{u} = [i, d, mo]^T$. O sobrescrito T representa transposição.

Na equação (3), $d_{l\xi}$ é a distância do l -ésimo dipolo ao ξ -ésimo dipolo definida por

$$d_{l\xi} = [(x'_\xi - x'_l)^2 + (y'_\xi - y'_l)^2 + (z'_\xi - z'_l)^2]^{1/2},$$

$$l = 2, \dots, M-1, \text{ e } \xi = 2, \dots, M-1,$$

em que os índices l e ξ definem um par de dipolos adjacentes. Assim, a minimização do funcional $\delta(p)$ impõe que todas as distâncias entre todos os M dipolos sejam aproximadamente iguais. Matematicamente, $\delta(p)$ é a norma 1 da primeira derivada das distâncias entre os M dipolos (e.g., Tikhonov and Arsenin, 1977). O escalar não negativo λ controla um compromisso entre o funcional de ajuste dos dados (primeiro termo no lado direito da equação 2) e o funcional de regularização de primeira ordem de Tikhonov ($\delta(p)$, equação 3).

A minimização do funcional ϕ (equação 2) será obtida através do AG, usando representação real, cruzamento, mutação e elitismo.

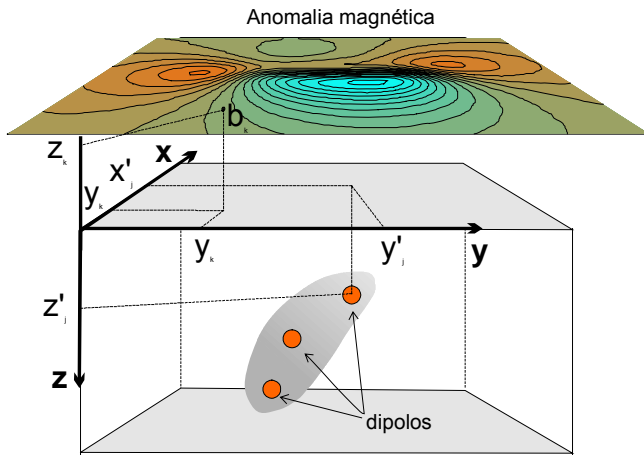


Figura 1. Anomalia de campo total (curvas de isovalores); dipolos estimados (pontos vermelhos) e fonte magnética (corpo cinza).

Algoritmo Genético.

O AG é uma técnica computacional baseada nos princípios da seleção natural Darwiniana usada para resolver uma ampla variedade de problemas não lineares. Nesta aplicação usamos o AG com representação real. O vetor \mathbf{q} é um cromossomo e cada elemento de \mathbf{q} representa um gene do cromossomo. A

implementado neste trabalho, envolvendo os seguintes passos (Parker, 1999).

- 1- Geração de uma população inicial com um conjunto de cromossomos, de forma randômica.
- 2- Avaliação do funcional, dado pela equação 2, para cada cromossomo.
- 3- Submissão dos cromossomos a um processo de seleção.
- 4- Aplicação de cruzamento, mutação e elitismo.
- 5- Geração de nova população.

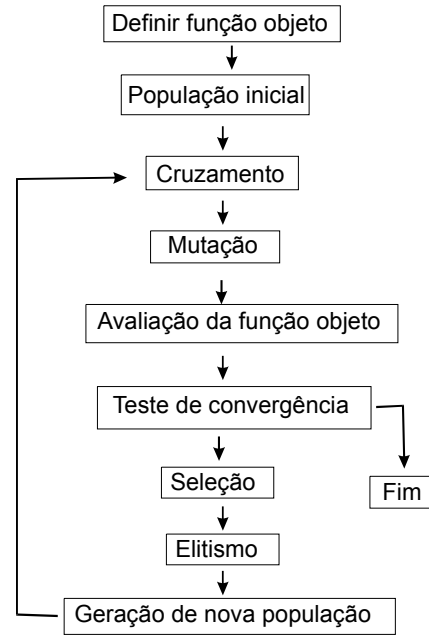


Figura 2. Fluxograma do Algoritmo Genético.

Resultados

Testes com dados sintéticos

Aplicamos o método para interpretar dados magnéticos sintéticos corrompidos com ruído e produzidos pelas seguintes fontes simuladas: 1-) prisma vertical, 2-) dique, 3-) prisma cúbico e 4-) dique inclinado. Todos esses corpos foram uniformemente magnetizados, com uma intensidade de magnetização de 60 A/m, inclinação de 20° e declinação de 45°. O campo geomagnético considerado tem intensidade de 24.300 nT, inclinação de -17° e declinação de 20°. Em todos os testes a anomalia do campo total foi contaminada com ruído pseudo aleatório de distribuição Gaussiana com média nula e desvio padrão de 0,1 nT.

As Figuras 3, 4, 5 e 6 mostram, de forma resumida, os resultados obtidos para os testes com dados sintéticos com o prisma vertical, o dique, o prisma cúbico e o prisma vertical respectivamente. As curvas de isovalores do campo magnético mostram que para os 4 exemplos os correspondentes ajustes das anomalias estão satisfatório. Os gráficos das coordenadas Cartesianas mostram uma vista em perspectiva dos dipolos estimados

(pontos vermelhos) obtidos pela inversão 3D e as fontes magnéticas são mostradas como prismas transparentes na cor cinza. Estes gráficos mostram que os dipolos conseguiram recuperar o esqueleto das fontes magnéticas 3D de forma satisfatória, nestes testes com dados sintéticos foram usados 10 dipolos. A Tabela 1 mostra a inclinação e declinação estimadas (\hat{i}, \hat{d}) nestes 4 testes sintéticos. Estes resultados mostraram que o método é eficiente para recuperar tanto a direção do vetor de magnetização como o esqueleto de corpos magnéticos 3D isolados e com geometrias diferentes.

Este método foi também usado na inversão de dados magnéticos sintéticos produzidos por fontes magnéticas com formas diferentes das apresentadas neste trabalho, com resultados também satisfatórios (Ponte-Neto & Barbosa, 2008).

Tabela 1 – Testes sintéticos – Inclinação e declinação verdadeiras (i, d) e estimadas (\hat{i}, \hat{d}) dos corpos magnéticos 3D mostrados nas Figuras 3 e 4

| Exemplos | d | \hat{d} | i | \hat{i} |
|----------------------|-----|-----------|-----|-----------|
| Exemplo 1 - Figura 3 | 45° | 44,2° | 20° | 19,9° |
| Exemplo 2 - Figura 4 | 45° | 46,7° | 20° | 19,6° |
| Exemplo 3 - Figura 5 | 45° | 46,8° | 20° | 19,1° |
| Exemplo 4 - Figura 6 | 45° | 44,7° | 20° | 20,1° |

Teste com dados reais

Demonstramos o desempenho do método de inversão através de uma anomalia do campo total, na área da Serra do Cabral no sudoeste do Brasil, MG no Cráton do São Francisco (Ussami, 1981; Chaves e Neves: 2005). O levantamento aeromagnético realizou-se a altitude de 1.200 m. O campo geomagnético, na ocasião do levantamento, tinha intensidade de 24.300 nT, inclinação de -17° e declinação de -17,5°. Para estimar a estrutura da fonte magnética 3D que produz a anomalia mostrada na Figura 7, consideramos um conjunto de 10 dipolos. As Figuras 7c e 7d mostram uma vista em perspectiva dos dipolos estimados (pontos vermelhos) obtidos pela inversão. Notamos que os dipolos estimados ajustam razoavelmente os dados magnéticos (como mostra a Figura 7b) e estão distribuídos, num plano horizontal, a uma profundidade de aproximadamente 25 km, tendo este plano dimensões de cerca de 40 km ao longo de ambas as direções: norte-sul e leste-oeste. A inclinação e a declinação estimada do corpo magnético foram 59° e -48°, respectivamente.

Conclusões

Desenvolvemos um método de inversão de dados magnéticos para estimar a direção de magnetização (inclinação e declinação), a intensidade do momento de dipolo e o esqueleto de corpos geológicos 3D isolados supondo uma distribuição de magnetização homogênea destes corpos. O modelo interpretativo em subsuperfície consiste de um número finito de dipolos. Estimamos as

posições horizontais e verticais de cada dipolo cujas distribuições espaciais formaram o esqueleto da fonte magnética. Consideramos que a intensidade do momento dipolar e a direção de magnetização são as mesmas para todos os dipolos, porém desconhecidas. Nossa inversão incorpora o critério de mínima distância entre as localizações dos dipolos para garantir que a distribuição espacial dos dipolos estimados esteja o mais próxima do possível de uma distribuição contínua formando o esqueleto de uma fonte magnética 3D. Implementamos nosso método usando algoritmo genético. Testes em dados sintéticos mostraram o bom desempenho do método na recuperação da direção do vetor de magnetização e do esqueleto de corpos simulando diques verticais, inclinados e corpos simétricos. Aplicamos o método a dados aeromagnéticos da Serra do Cabral, MG, e estimamos dipolos distribuídos sobre um plano horizontal na profundidade de 25 km, com inclinação e declinação de 20,5° e 45,2°, respectivamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Geofísica do ON e ao CNPq (projeto no. 471913/2007-3.) pelo apoio financeiro. O autor Almeida-Junior I. N. recebeu apoio financeiro do CNPq na forma de bolsa de iniciação científica. V.C.F.B agradece o apoio financeiro recebido do CNPq via bolsa de pesquisa (no. 301128/2007-3) e da FAPERJ via projeto de pesquisa (no. E - 26/100.688/2007).

Referências

- Blakely, R.J., 1995. Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications. Cambridge University Press.
- Chaves, A.O. , & Neves, J. M. C., 2005. Magmatism, rifting and sedimentation related to Late Paleoproterozoic mantle plume events of Central and Southeastern Brazil. Journal of Geodynamics 39, 197–208.
- Parker P. B., 1999. Genetic Algorithms and their use in Geophysical Problems. Tese de doutoramento, University of California at Berkeley, EUA.
- Ponte-Neto, C.F., & Barbosa, V.C.B, 2008. 3D magnetic sources' framework estimation using Genetic Algorithm, Eos Trans. AGU, 89(23), In: Jt. Assem. Suppl., Abstract GP31D-03.
- Ussami, N., 1981. Interpretação quantitativa dos dados aeromagnéticos na área compreendida entre 42°-47°W e 15°-19°S (Minas Gerais, Brasil). M. Sc. thesis (in portuguese) , IAG-USP.
- Tikhonov, A. N., and Arsenin V. Y., 1977. Solutions of ill-posed problems. V. H. Winston & Sons.

Exemplo 1 - Prisma Vertical - Resultados

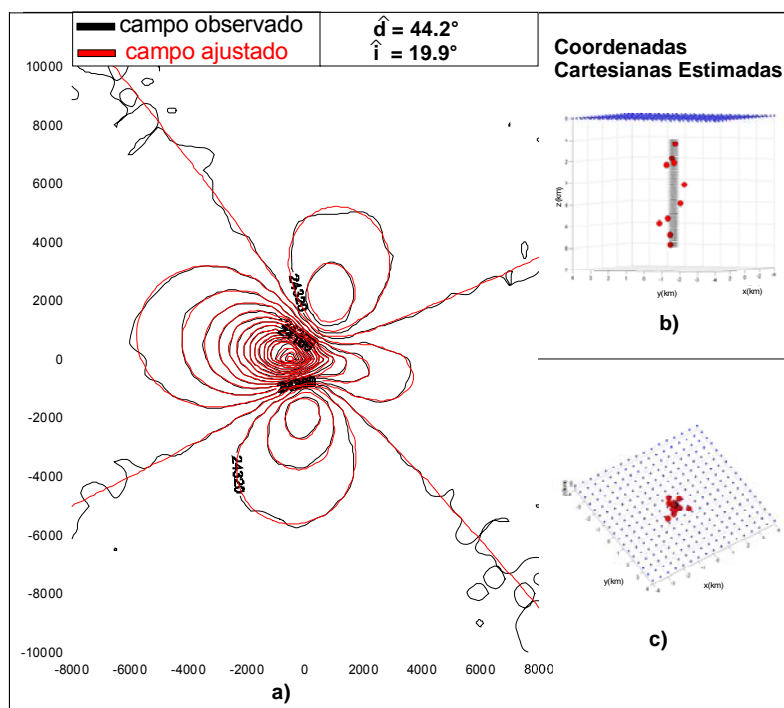


Figura 3

Figura 3. Prisma Vertical.

(a) Dados observados contaminados com ruído (linhas pretas) e dados ajustados (linhas vermelhas) da anomalia de campo total produzida por simulação de uma fonte magnética 3D.

(b) e (c) Vistas em perspectiva das posições dos dipolos estimados (pontos vermelhos). As fontes magnéticas são mostradas como prismas transparentes na cor cinza em (b)

Exemplo 2 - Dique Vertical - Resultados

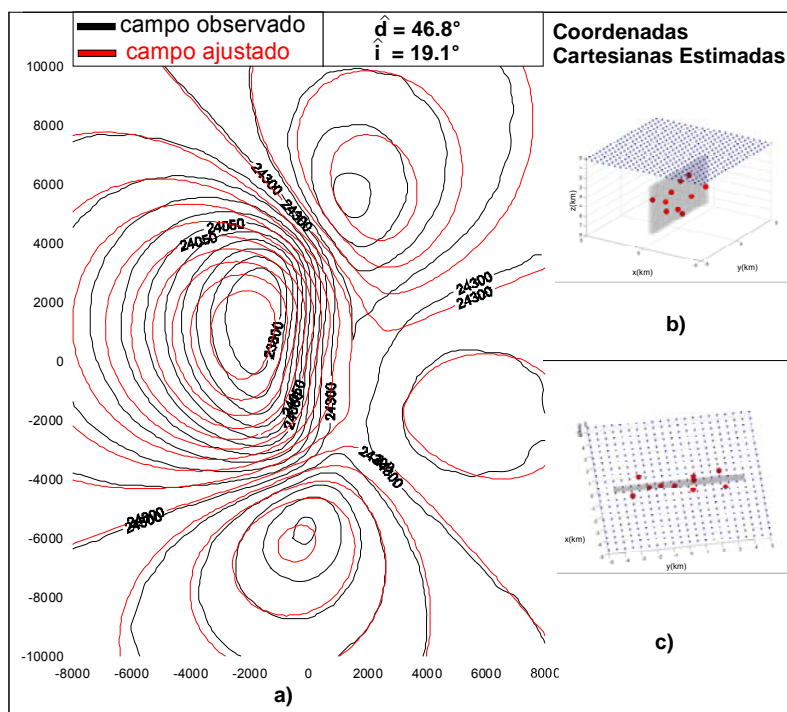


Figura 4

Figura 4. Dique Vertical.

(a) Dados observados contaminados com ruído (linhas pretas) e dados ajustados (linhas vermelhas) da anomalia de campo total produzida por simulação de uma fonte magnética 3D.

(b) e (c) Vistas em perspectiva das posições dos dipolos estimados (pontos vermelhos). As fontes magnéticas são mostradas como prismas transparentes na cor cinza em (b)

Exemplo 3 - Prisma Cúbico - Resultados

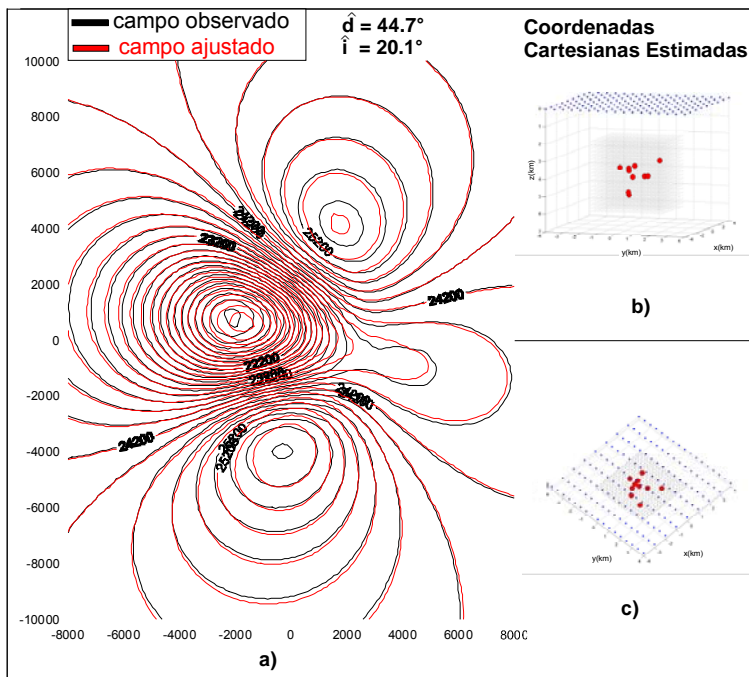


Figura 5

Figura 5. Prisma Cúbico.

(a) Dados observados contaminados com ruído (linhas pretas) e dados ajustados (linhas vermelhas) da anomalia de campo total produzida por simulação de uma fonte magnética 3D.

(b) e (c) Vistas em perspectiva das posições dos dipolos estimados (pontos vermelhos). As fontes magnéticas são mostradas como prismas transparentes na cor cinza em (b)

Exemplo 4 - Dique Inclinado - Resultados

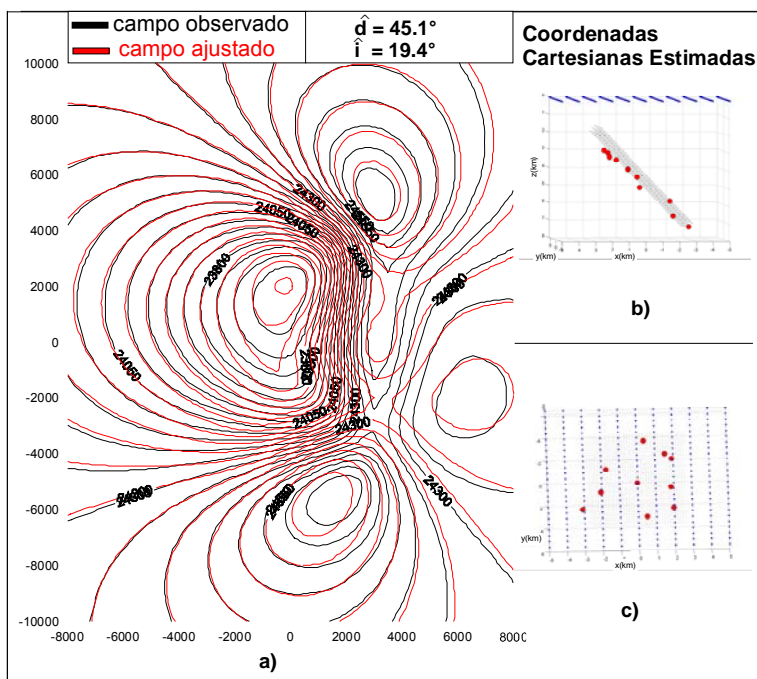


Figura 6

Figura 6. Dique Inclinado.

(a) Dados observados contaminados com ruído (linhas pretas) e dados ajustados (linhas vermelhas) da anomalia de campo total produzida por simulação de uma fonte magnética 3D.

(b) e (c) Vistas em perspectiva das posições dos dipolos estimados (pontos vermelhos). As fontes magnéticas são mostradas como prismas transparentes na cor cinza em (b)

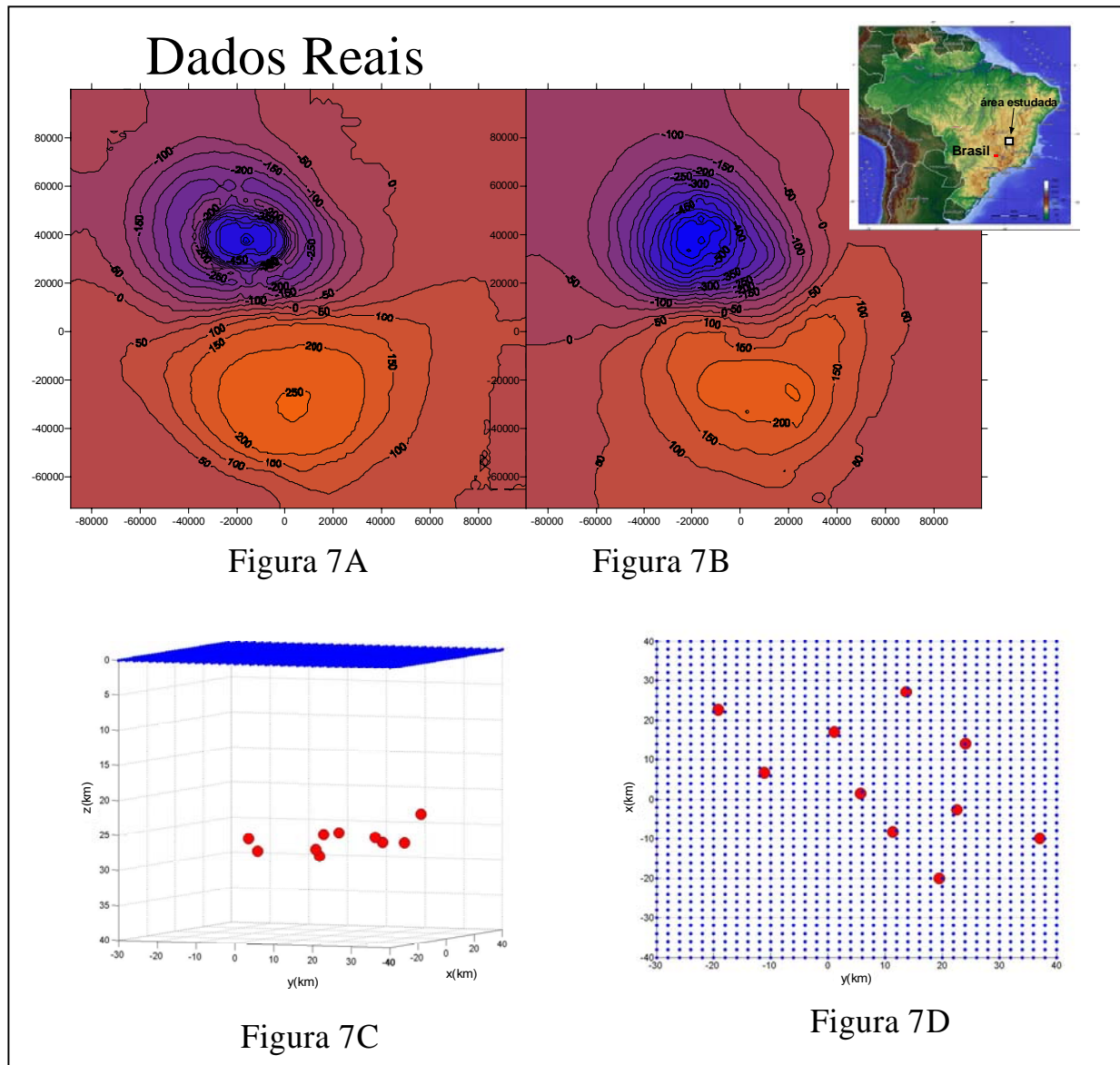


Figura 7. Anomalia magnética de campo total na Serra do Cabral, MG Brasil.

(A) Anomalia observada; (B) Anomalia ajustada; (C) e (D) Vistas em perspectiva dos dipolos magnéticos estimados (pontos vermelhos) obtidos pelo método de inversão proposto.