



Modelagem numérica de dados tensoriais de aerogradiometria gravimétrica 3D

Marco Antonio Braga, CVRD e Jadir da Conceição da Silva, UFRJ

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of the 9th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Air-FTG is nowadays the only existing airborne full tensor gradiometer technology that is flown for both detailed and regional surveys. The system takes real-time measurements of the differences in the gravity gradient field in three orthogonal directions and at the same time compensates for bias in the orientation and movement of the aircraft. Each one of these measurements is related to either density contrasts or geometry of discrete bodies. In this work we elaborate a numerical algorithm to compute the five synthetic g_{xx} , g_{xy} , g_{xz} , g_{yy} and g_{yz} independent tensor components. Results show that gradiometer depict a more observable advantage for identification of near-surface targets, revealing structures such as lineaments, edges, corners and as a consequence body shapes and thickness. It is also shown that the best images of the subsurface rocks acquired by the air-FTG platform can provide more realistic information than the conventional vertical ground gravity field instruments when interpreting lateral density contrasts

Introdução

A atividade de exploração geofísica normalmente demanda altos riscos e grandes investimentos. A proposição de novas técnicas e até mesmo novas ferramentas, computacionais ou numéricas adicionais, que juntamente com outras já disponíveis no mercado, aumentam a confiabilidade na avaliação de reservas de minério e outros recursos de interesse econômico, reduzindo riscos sem adicionar altos custos, são de grande utilidade. Tradicionalmente, em se tratando do método gravimétrico, a componente vertical do campo gravitacional era a única componente medida por causa da facilidade de sua obtenção e a simplicidade na interpretação dos dados. Por outro lado, este método tradicional não permite diferenciar corpos rasos e de menor dimensão dos ruídos que inevitavelmente contaminam os dados. Para contornar este problema, tornou-se necessário propor um novo método que permitisse medir o tensor gradiente de gravidade. Uma balança de torsão foi inicialmente utilizada para este fim, no entanto, sem sucesso devido à dificuldade de uso, adicionado aos intrincados problemas de interpretação e entendimento (Bell, 1998). Entretanto, a importância e utilidade do tensor gradiente de gravidade na localização de objetos em sub-superfície tem sido bastante desejada (Butter, 1995). Os desenvolvimentos recentes nos sistemas de aerogradiometria têm resultado em interesse renovado nas medidas do gradiente de gravidade,

especialmente na delimitação de corpos anômalos rasos e médios, como, por exemplo, corpos de minérios (Jekley, 1998 e Vasco, 1989). Na verdade, a era moderna da gradiometria nasceu quando a Bell Aerospace explorou a viabilidade de desenvolvimento de um instrumento de aerogradiometria gravimétrica de base móvel (GGI) (Metzger, 1982). Em 1990 a BHP Billion construiu o sistema FALCONTM, com o instrumento AGG (Airborne Gravity Gradiometer), cuja operação de rotina só começou de fato no fim de 1999 e início de 2000 (Lee, 2001). Contudo, a possibilidade de se medir as componentes completas do tensor só se tornou viável recentemente, com o advento do sistema 3D-FTG (Tridimensional Full Tensor Gravity Gradiometer), que na verdade só precisa medir as cinco componentes linearmente independentes do tensor de gradiente g_{xx} , g_{xy} , g_{xz} , g_{yy} e g_{yz} (ou T_{xx} , ..., T_{yz} , como são algumas vezes denominados) do campo gravitacional, em diferentes direções. Este sistema é genericamente denominado de "aerogradiometria gravimétrica 3D".

Teoria

É notório que o campo gravitacional \mathbf{g} satisfaz as equações gerais

$$\nabla \cdot \mathbf{g} = -4\pi G\rho, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{g} = 0, \quad (2)$$

onde G é a constante universal gravitacional e ρ é distribuição anômala de densidade no volume D a ser levantado. A solução destas equações é dada por

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \iiint_D \rho(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r}' - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} dv', \quad (3)$$

onde \mathbf{r} é um ponto de observação, sendo que a integração é conduzida sobre a variável \mathbf{r}' . O campo gravitacional pode ser expresso pelo seguinte potencial gravitacional:

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \nabla U(\mathbf{r}), \quad (4)$$

onde

$$U(\mathbf{r}) = G \iiint_D \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} dv'. \quad (5)$$

A segunda derivada do potencial gravitacional

$$g_{\alpha\beta} = \frac{\partial^2}{\partial\alpha\partial\beta} U(\mathbf{r}), \quad \alpha, \beta = x, y, z, \quad (6)$$

conduz ao Tensor Gradiente de Gravidade, isso é,

$$\hat{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Metodologia

Para a implementação da metodologia proposta neste trabalho, baseada nas equações (1)-(7), as etapas de modelagem numérica são indicadas abaixo. Estas etapas têm por fundamento a redução das equações (1)-(7) em uma expressão simplificada para o tensor do gradiente de gravidade tridimensional (3D) e posterior elaboração de uma rotina computacional em linguagem FORTRAN para os cálculos das componentes $g_{\alpha\beta}$. Para isto, propomos os seguintes passos, conforme sugerido por Zhdanov (2002):

(a) Discretização da região 3D em células de dimensões dx , dy e dz nas três direções coordenadas X , Y e Z , respectivamente;

(b) Definição dos pontos centrais de cada célula $\mathbf{r}' = (x'_k, y'_k, z'_k)$, onde $k = 1, 2, \dots, M$, sendo M o número total de células;

(c) Definição do número discreto de pontos de medidas na altitude de vôo h , isto é, $\mathbf{r} = (x_n, y_n, z_n)$, para $n = 1, 2, \dots, N$, sendo N o número total de pontos de medida;

(d) Usando modelos discretos de parâmetros e dados definidos nos passos (b) e (c), desenvolvemos o seguinte operador de modelagem direta para calcular os componentes do tensor de gradiente de gravidade:

$$g_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_n) = \sum_{k=1}^M A_{nk}^{\alpha\beta} \rho_k, \quad n = 1, \dots, N \text{ e } \alpha, \beta = x, y, z, \quad (8)$$

onde

$$A_{nk}^{\alpha\beta} = G \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{r_{nk}^3} K_{nk}^{\alpha\beta}, \quad (9)$$

sendo que r_{nk} é a distância entre \mathbf{r}' e \mathbf{r} , e

$$K_{nk}^{\alpha\beta} = \begin{cases} 3 \frac{(\alpha'_k - \alpha_n)(\beta'_k - \beta_n)}{r_{nk}^2}, & \alpha \neq \beta, \\ 3 \frac{(\alpha'_k - \alpha_n)^2}{r_{nk}} - 1, & \alpha = \beta. \end{cases}$$

(e) Desenvolver uma rotina FORTRAN para calcular as componentes g_{xx} , g_{xy} , g_{xz} , g_{yy} e g_{yz} . Como a componente g_{zz} é aquela que realmente determina o contraste de densidade do meio, ela pode ser calculada como o negativo da soma das componentes g_{xx} e g_{yy} , de acordo com a equação de Laplace.

O Equipamento

Air-FTGTM é uma tecnologia de plataforma móvel com acelerômetros múltiplos que medem o tensor total do gradiente da gravidade (Figura 1). Gradiometria da gravidade mede a mudança na taxa espacial do campo gravitacional. Essa forma de medição capta os sinais de alta frequência associados às variações de densidade

que estão mais próximas da superfície. Isso é possível, pois o sinal do gradiômetro cai com o cubo da distância do alvo. O sistema trabalha coletando medidas ultrasensíveis em tempo real das diferenças do gradiente do campo gravitacional em todas as direções. A física das medidas segue a lei de Faraday, conforme indicado na Figura 2. Os dados de gradiente podem ser relacionados diretamente com a estrutura geológica e corpos discretos que tenham contrastes relativos com as rochas encaixantes. O sistema FTG é composto por 3 Instrumentos (Gradiômetros) de Gradiente Gravitacional (GGIs) (Figura 4). Cada um consiste de 2 pares acelerômetros opostos arranjados em um disco (Figura 5). O gradiente do campo gravitacional é medido pela diferença lida entre os 2 pares opostos dos acelerômetros em cada disco. Os 3 GGIs são montados de forma que seus eixos fiquem perpendiculares e formem o mesmo ângulo com a vertical. Visto de cima a projeção dos 3 eixos é de 120 graus (Figura 3). Para minimizar qualquer influência relacionada à orientação ou à direção do movimento do instrumento, a assembléia do GGIs tem uma rotação constante em relação ao eixo vertical. O acelerômetro é composto por uma massa (proof mass) envolta em uma bobina e presa a um campo magnético gerado por um dipolo (conforme Figura 2). A massa está presa ao campo magnético, qualquer movimento feito pela massa (que é sensível a massas externas) é registrado pelo "capacitive pick off". Esse valor lido (corrente elétrica) passa por um filtro e por um amplificador e é aplicado de volta na espiral que fica envolta a massa (proof mass) para mantê-la parada. Essa corrente elétrica é traduzida em tensão elétrica e essa voltagem é igual a aceleração.

Resultados

Os resultados mostrados nesta seção foram adquiridos usando a técnica *drape*, onde a altura de vôo é fixa com relação a superfície do terreno. Para os modelos geológicos sintéticos aqui propostos, esta altura de vôo foi de 100m e os valores dos gradientes de gravidade serão valores apenas relativos, pois estaremos assumindo o valor de $G = 1.0$. Além disso, será feita uma modificação essencial com relação ao modelo publicado por Zhdanov (2002). Suporemos que o meio geológico e constituído por um meio de fundo com densidade ρ_0 e incluso nele corpos discretos com densidade ρ_1, ρ_2 etc. Neste caso, visando otimizar o algoritmo em termos de tempo de computação, os valores dos gradientes de gravidade para este modelo de fundo serão determinados separadamente através de solução semi-analítica mostrada pela Figura 6. Como estamos supondo um meio de fundo homogêneo, isotrópico e linear, as componentes do tensor são retas com coeficientes lineares nulos e coeficientes angulares crescentes ou decrescentes, a depender da componente em questão. A seguir, os cálculos somente precisam ser feitos discretizando as anomalias e inserindo nas equações (8) apenas os seus contrastes com relação a densidade de fundo, i.e., $\rho = \rho_n - \rho_0$. Isto significa menor região a ser discretizada e, por conseguinte, uma apreciável redução de cálculos e tempo de computador. A Figura 6 foi obtida posicionando a aeronave no centro de um modelo de área 4000x4000 m², a uma altura de vôo de 100 m, e com valores crescentes da densidade de fundo ρ_0 , variando de 2.0 g/cm³ até 3.0 g/cm³. Para o modelo

sintético proposto neste trabalho, obtemos os componentes do gradiente de gravidade pela expressão simples:

$$g_{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta} \rho_0, \quad (10)$$

onde ρ_0 é a densidade de fundo e $\alpha, \beta = x, y, z$. Neste caso, $a_{xx} = -1,767$; $a_{xy} = 0,006$; $a_{xz} = 0,019$; $a_{yy} = -1,452$ e $a_{yz} = 3,538$. Os círculos superpostos as linhas da Figura 1 são os valores das componentes do tensor calculados para uma densidade de fundo $\rho_0 = 2,45 \text{ g/cm}^3$. Verificamos os ajustes perfeitos para todas as medidas quando utilizamos as informações da equação (10) com seus respectivos valores numéricos.

A Figura 7 mostra as componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica 2.7 g/cm^3 perfazendo uma área de $2000 \times 2000 \text{ m}^2$, tendo em seu centro uma massa anômala de minério de massa específica $4,2 \text{ g/cm}^3$, de volume $400 \times 400 \times 400 \text{ m}^3$. O topo do alvo dista de 100 m da superfície do solo. As semelhanças dos resultados da Figura 7 com o exemplo sintético publicado por Murphy (2004) corroboram a validade e eficiência do algoritmo aqui implementado. Pode-se ver facilmente que a componente g_{xx} identifica com exatidão as bordas leste-oeste do corpo, e a componente g_{yy} , as bordas norte-sul. A característica de quadrupolos da componente g_{xy} , com dois altos e dois baixos gravimétricos bem definidos, tem forte correlação com corpos discretos, sendo bastante eficiente na identificação de corpos de minério. As componentes g_{xz} e g_{yz} , conforme já descrito por Murphy (2004), identificam os centros de massa da anomalia.

A Figura 8 apresenta as componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica adquiridos sobre um terreno idêntico ao da Figura 7, mas contaminado pela presença de 9 massas superficiais de volume $40 \times 40 \times 40 \text{ m}^3$ e densidade $3,0 \text{ g/cm}^3$, com topo localizado na profundidade de 20 m . Fica evidenciado a dificuldade em se identificar a forma dos alvos quando estes corpos rasos ocorrem nas proximidade do alvo principal. Daí a necessidade de utilização de um filtro passa baixa com o objetivo de excluir estes sinais de alta frequência.

Finalmente, na Figura 9 mostramos as componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica 2.7 g/cm^3 , perfazendo uma área de $2000 \times 2000 \text{ m}^2$, e com um corpo tabular de 60 m de espessura com direção leste-oeste e densidade de $3,4 \text{ g/cm}^3$. Este modelo tem como objetivo estudar a possibilidade de identificar os possíveis lineamentos resultantes da presença de corpos tabulares, diques e outras estruturas contínuas.

Conclusões

Um algoritmo numérico rápido e eficiente foi implementado para calcular as cinco (5) componentes linearmente independentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica 3D. A proposição de um meio de fundo, identificado por uma solução semi-analítica, e a necessidade de discretizar apenas as regiões que apresentem contraste de densidade com este meio, reduziu sensivelmente os tempos de computador. Notamos que o sistema apresenta máxima eficiência quando os alvos são corpos discretos e

relativamente rasos. No entanto, concluímos, baseados nos resultados apresentados, que a presença de heterogeneidades muito rasas e contrastantes com o meio de fundo, independentes dos tamanhos e densidades, tornam o reconhecimento dos alvos um pouco difícil, principalmente aquelas componentes relacionadas com as dimensões do alvo. Embora isto pareça uma limitação da técnica FTG, percebemos que a componente g_{zz} , que na verdade inclui todas as características geológicas relacionadas com a densidade do alvo, permite separar o alvo de outras heterogeneidades, consideradas ruídos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e ao Departamento de Geologia da UFRJ (DEGEL/UFRJ) pelo apoio financeiro e suporte computacional indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Bell, R., 1998, Gravity gradiometer, Scientific American 278, 24-79.
- Butler, D. K., 1995, Generalized gravity gradient analysis for 2-D inversion, Geophysics, 60, 1018-1028,
- Lee, J. B., 2001, FALCON gravity gradiometer technology: Exploration Geophysics, 32, 247-250.
- Jekely, C., 1988, The gravity gradiometer survey system (GGSS). EOS Transaction of the American Geophysical Union, 69, 116-117.
- Metzger, E. H., 1982, Development experience of gravity gradiometer system, IEEE Plans, 323-332.
- Murphy, C. A., 2004, The air-FTG airborne gravity gradiometer system. ASEG-PESA, Sydney-2004, 7-14.
- Vasco, D. W., 1989, Resolution and variance operators of gravity and gravity gradiometry, Geophysics, 54, 889-899.
- Zhdanov, M. S., 2002, Geophysical inverse theory and regularization problems: Elsevier Science Publishing Co. Inc.

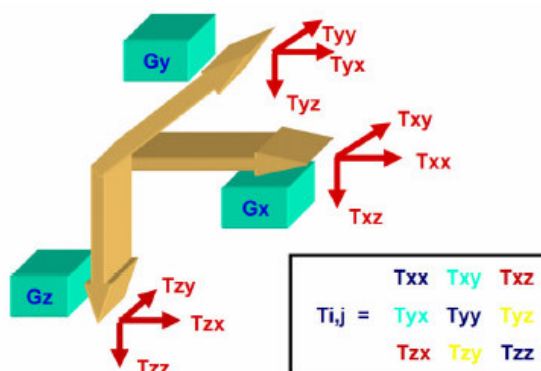


Figura 1: Tensor de gravidade indicando em verde as componentes da gravidade e em vermelho as componentes do tensor (Extraído de Murphy, 2004).

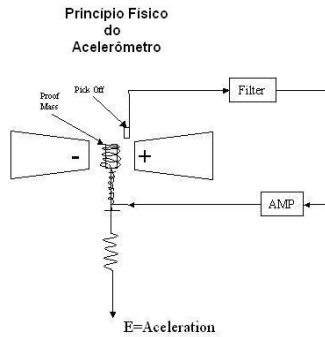


Figura 2: Esquema ilustrativo do princípio físico do gradiômetro, que utiliza a Lei de Faraday para o registro dos sinais.

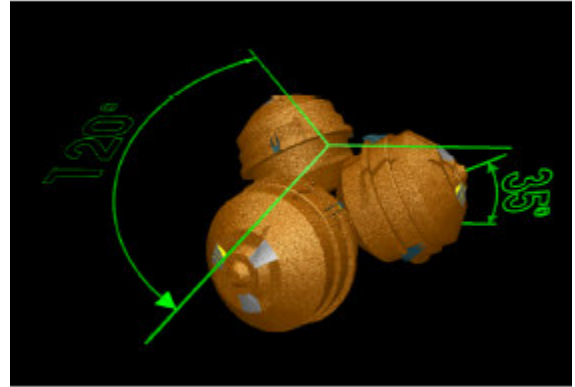


Figura 3: Os 3 GGIs montados de forma que seus eixos fiquem perpendiculares e formem o mesmo ângulo com a vertical. Visto de cima a projeção dos 3 eixos é de 120 graus (Extraído de Murphy, 2004).

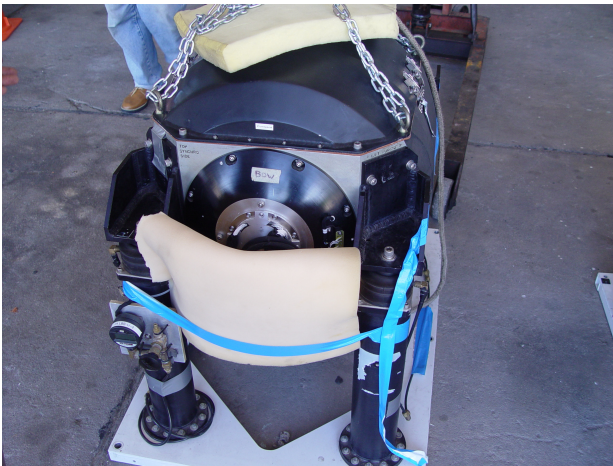


Figura 4: A tecnologia Air-FTG™ de plataforma móvel com acelerômetros múltiplos que medem o tensor total do gradiente da gravidade.



Figura 5: Vista geral do disco do GGI que comporta em seu interior os pares de acelerômetros.

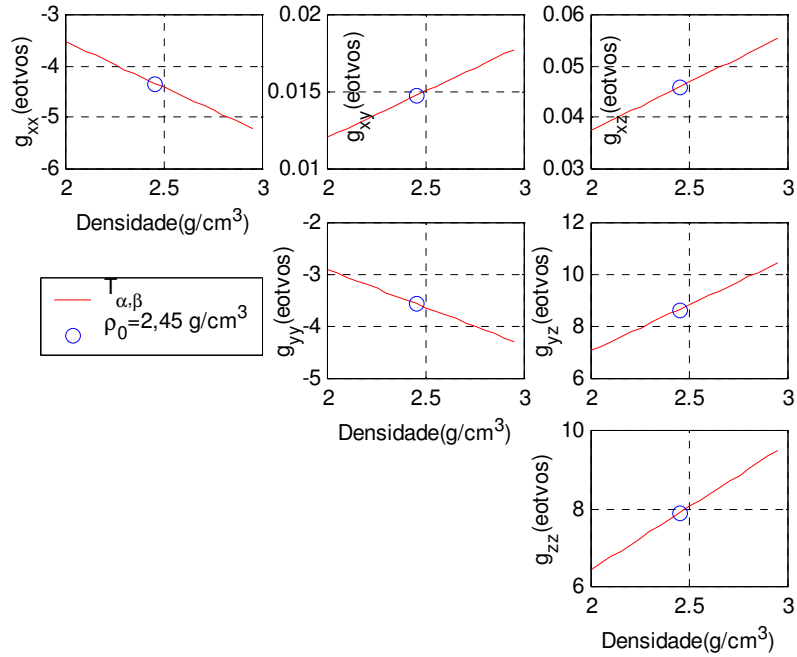


Figura 6: Componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica, em função da variação de densidade, adquiridos no ponto central de um meio de fundo homogêneo, isotrópico e linear.

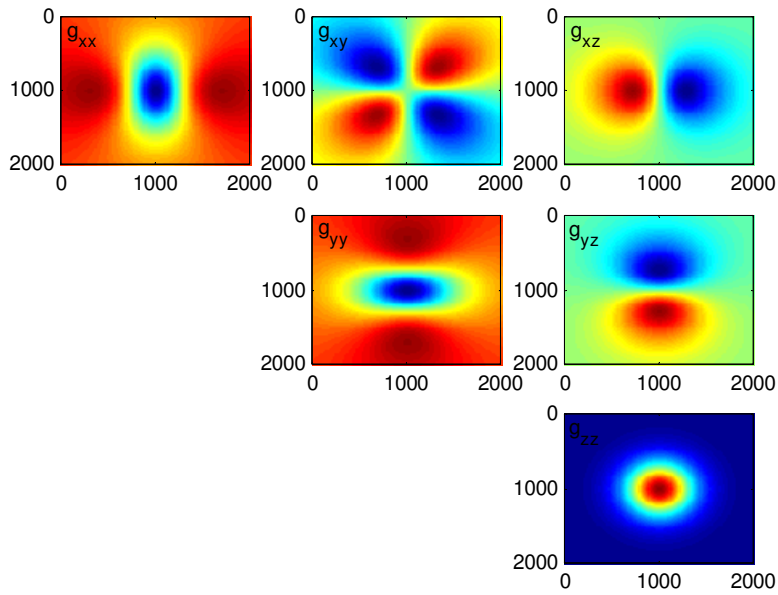


Figura 7: Componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica 2.7 g/cm³, perfazendo uma área de 2000x2000 m², e tendo em seu centro uma massa anômala de minério de massa específica 4,2 g/cm³, volume 400x400x400 m³ e cujo topo dista 100 m da superfície do solo.

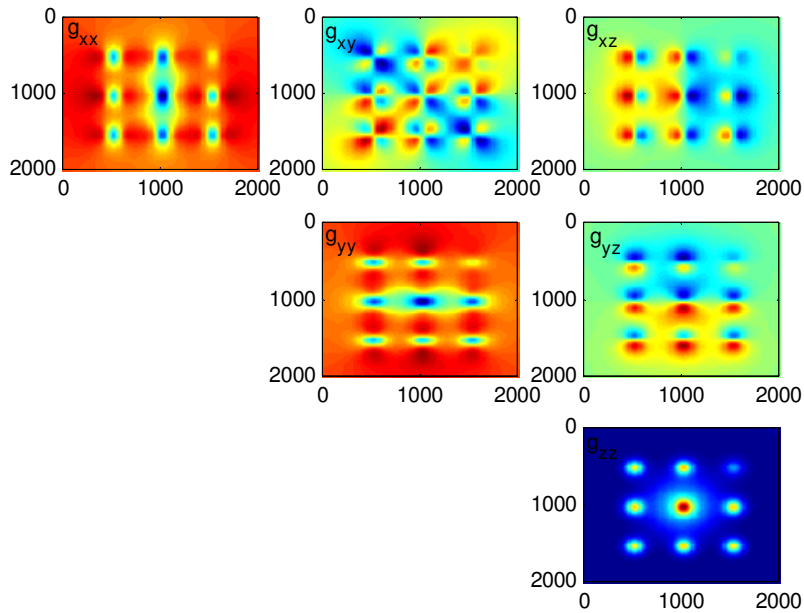


Figura 8: Componentes do tensor de aerogradiometria gravimétrica adquiridos sobre um terreno idêntico ao da Figura 7, mas contaminado pela presença de 9 massas superficiais de volume $40 \times 40 \times 40 \text{ m}^3$ e densidade $3,0 \text{ g/cm}^3$, com topo localizado na profundidade de 20m.

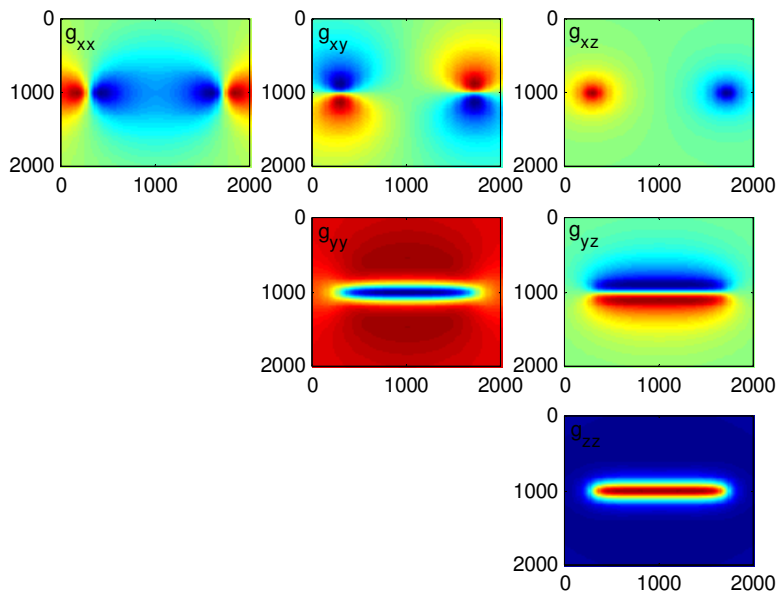


Figura 9: Componentes do tensor de aerogradiometria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica $2,7 \text{ g/cm}^3$, perfazendo uma área de $2000 \times 2000 \text{ m}^2$, e com um corpo tabular de 60m de espessura com direção leste-oeste e densidade de $3,4 \text{ g/cm}^3$.