



Inversão gravimétrica 3D cc de sal

Fernando, J. S. Silva Dias*, Valéria C. F.

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Abstract

We present a 3D gravity inversion method that considers location and geometry of 3D salt bodies. Our approach estimates a 3D density-contrast distribution assuming a piecewise constant function on a user-specified grid of cells. To estimate a stable density-contrast distribution, we use an iterative solution that fits the observed anomalies while accounting for measurement errors and favors contrast values closest to pre-specified geometric elements. Our inversion method consists of iterative loops. The outer loop uses an approach that starts with a coarse grid of first-guess geometric elements (axes and points). Our corresponding assigned density contrast values. In the second iteration on, this strategy refines the grid and creates a new set of geometric elements associated with the density-contrast distribution for the next iteration. Each geometric element operates as a skeleton of a particular, homogeneous salt body to be imaged. The method incorporates known density contrast values by assigning these values to each geometric element. The iteration stops when the geometries of bodies are invariant along successive iterations. Our method fits synthetic gravity data of a salt body, whose density contrast varies from positive to negative. We tested two hypotheses about the geometric elements assigned density contrast on the real field from Galveston Island salt dome, offshore Brazil. In the first one, we estimated a vertical dome with depth to the bottom at 5 km. In the second hypothesis, we estimated a cylindrical dome with associated overhang and depth to the base.

Introdução

Diápiros de sal são estruturas associadas aos maiores campos de hidrocarbonetos recentemente. A reconstrução 3D (ou inversão) de sal usando dados gravimétricos tem sido discutida por vários autores. A maioria dos métodos gravimétricos publicados utiliza a modelagem direta interativa. Starich

Imagem de sal

N e João B. C.

Geofísica,
Técnico em Geofísica
e seus
pósitos

... the ... our ... on by ... on a ... and ... the ... the ... bodies ... axes ... defined ... ring ... of ... d the ... the ... and ...) and ... rates ... id for ... loop. ... eous ... on of ... easily ... by ... The ... f salt ... apply ... salt ... aries ... logic ... the ... maly ... A. In ... salt ... cond ... h an

no imageamento de domos

A

4) integraram interpretação direta gravimétrica 3D para domos de sal. Yarger et al. (2001) utilizou uma imagem 2D de um domo de sal em complemento a uma imagem de um domo de sal (Huston et al. (2004) imageamento da modelagem gravimétrica e informação de furos de poços. Oezsen (2004) utilizou gravimétrica 3D de estruturas gravimétricos integrados à cartografia interativa da relação para condicionar não apenas velocidades, mas também a imagem acima do refletor alvo. A gravimétrica tem sido utilizada envolvendo corpos de sal, como uma distribuição 3D de sal (Bear et al. (1995) mini- e uma distribuição 3D de sal usando SVD. Nagihara & Hamada (2000) um corpo de sal usando a técnica para minimizar a norma L2 dos contrastes de densidade, minimizam a norma Euclidiana da distribuição 3D de sal usando um algoritmo de minimização. Kisabeth (2000) apresentou um campo gravimétrico para a base de um depósito de sal (Huston et al. (2001) também estudou a de sal, a partir da anomalia gravidade de cinco componentes e presumindo que a interface é definida pela sísmica. Algumas gravimétricas estimam a geometria do sal usando, como aproximação, poligonais em 2D, (Silva et al. (2004) em 3D (Morales & Hansen, 2000), apresentamos a inversão de uma estratégia de aprendizado (Silva et al., 2007), para recuperar sal. Estimamos uma distribuição de densidade que ajusta a imagem instrumental e define a imagem em torno de elementos pontuais e eixos que compõem a estrutura presumida para os elementos geométricos dos corpos de sal e devem

mpre que por
presumidas p
e o posic
sempre é t
bre a área e
emplo, defini
usando a inf
pela sísmica.

os aqui uma
posto por Sil
de Inversã
m Adaptativa
fontes 3D, c
do por um m
ras 3D justa
densidade c
discreto do pi

$(p_1, \dots, p_M)^T$ o ve
 $(q_1, \dots, q_N)^T$ o ve
matriz $N \times M$
 c_{ij} é a corr
produzida pe
bservação e c

ir uma distri
nica e estáv
que satisfaç
nomalia gravi
arte do exc
em torno dos
especificados
ente, descri
to geométric
densidade.
opera como
gênea partic

IGAdapt é c
ntegrados. O
da Aprendiz
pelas suces
inicial, ass
tos) e dos se
lhos inicialm
na nova itera
em seguida,
e, uma di
e densidade
eto estrutura
valores de contrastes-alvo
algoritmo externo. O nos
uma distribuição 3D de cc
vínculos similares aos
interativas gravimétrica e
Silva & Barbosa (2006) e

ne
oc
er
c
s
ãc
tc

al
tri
oc
ac
et
x
ér
o

na
a:
s
rti
ri:
oc

de
l
n:
rv
fa
je
rp
Ar
o
),
es
gl

r
er
iti
iç
oc
di
di
it
i
is
di
di
e
le
s
de

ais e
Vale
mentos
o do
prete
mentos
o de

i do
e é
com
um
ossa
tindo
com
cido.
scrito

(1)

étrica
smas
cujo
mpo
sima
ário.

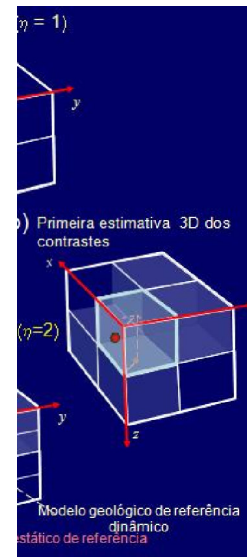
s de
ocura
o 1),
sente
assa
eixos
que,
s. A
o de
ento
uma
3D a

tmos
lo de
i), é
odelo
rtural
is de
prete
será
tima,
de
ativo
ntes
pelo
stima
ando
ões
s por

Barbosa & Silva (2006),

em adaptativa

= 1 do EAdapt, o intérprete
rpretativo inicial, especifica os
riciais (eixos e pontos) e os
es-alvo de densidade (Figura
ométricos (ponto vermelho na
s associados de contraste-alvo
o que chamamos de modelo
stático, que é a informação a
rprete, na primeira iteração e
lgo das sucessivas iterações.
automaticamente atribui ao j-
do contraste-alvo n^{alvo} , do
s próximo ao j-ésimo prisma.
ferência estático e o modelo
so método estima uma primeira
tes de densidade (exemplo da
ersão realizada pelo algoritmo
a subseção.



do esquema da aprendizagem
meira iteração, $\eta=1$, definição do
do modelo geométrico estático. (b)
contrastos de densidade, $\eta=1$. (c)
modelo interpretativo e do modelo
geológico de referência dinâmico na segunda iteração, $\eta=2$.

Da segunda iteração em diante, o EAdapt
automaticamente divide cada prisma 3D em oito novos
prismas estabelecendo um novo modelo interpretativo
(Figura 1c). Analogamente, esta estratégia
automaticamente cria um novo conjunto de elementos
geométricos e de valores de contrastes-alvo de
densidade associados. Este novo conjunto é composto
exclusivamente de pontos (ponto amarelo na Figura 1c)
que estarão localizados no centro dos prismas, cujos
contrastos de densidade estimados na iteração anterior
são iguais, ou próximos, aos correspondentes valores

dos contrastes-alvo (prisma com arestas destacadas em azul claro na Figura 1b e 1c).

Os associados contrastes-alvo de densidade destes novos pontos são os correspondentes contrastes-alvo de densidade dos prismas onde estes pontos estão localizados. Os novos elementos geométricos (pontos) e seus associados contrastes-alvo de densidade formam o modelo geológico de referência dinâmico. Especificamente, os novos esqueletos estruturais serão automaticamente criados na η -ésima iteração ($\eta \geq 2$) e serão descartados ao fim da mesma η -ésima iteração da EAdapt, após a estimativa da η -ésima distribuição 3D de contrastes de densidade. As iterações param quando as geometrias dos corpos estimados tornam-se invariantes ao longo das sucessivas iterações da estratégia de aprendizagem adaptativa. Resumidamente, na η -ésima iteração da EAdapt, a região da fonte é automaticamente discretizada em uma grade 3D regular de $2^{(\eta-1)}m_x \times 2^{(\eta-1)}m_y \times 2^{(\eta-1)}m_z$ de prismas. Esta estratégia pode criar, automaticamente, um novo conjunto de elementos geométricos e os correspondentes valores de contrastes-alvo de densidade.

Estimativa da distribuição do contraste de densidade

Em cada iteração da IGAdapt estimamos uma distribuição de contrastes de densidade 3D. Matematicamente, isto é realizado através do seguinte método inverso iterativo. Na iteração inicial ($k = 1$), ao vetor de referência a priori, \mathbf{p}_o^k , são atribuídos valores de contrastes de densidade muito próximos de zero. A seguir, um vetor de correções aos parâmetros é computado, $\Delta \mathbf{p}^k$, tal que, estas correções afetarão principalmente os parâmetros (prismas) mais próximos dos elementos geométricos (eixos e pontos) e explicarão a anomalia observada (Silva

Dias et al., 2007). Após estimar o vetor perturbação, $\Delta \mathbf{p}^k$, ele é somado a \mathbf{p}_o^k produzindo, deste modo, a estimativa 3D atualizada dos contrastes de densidade $\mathbf{p}^{(k+1)}$.

As componentes do vetor de referência a priori, \mathbf{p}_o^k , são automaticamente redefinidas, em cada iteração, através de alguns critérios de penalização. Na k -ésima iteração, os critérios de penalização impõem que se o j -ésimo elemento estimado, p_j^k , violar um dos limites do intervalo assinalado aos valores de contrastes-alvo de densidade, então, o j -ésimo elemento de \mathbf{p}_o^k é substituído pelo valor do extremo violado (0 ou p_j^{alvo}) e a j -ésima componente do vetor de correção, Δp_j^k , é forçada a ter um pequeno valor. Por outro lado, se a j -ésima estimativa, p_j^k , na k -ésima iteração, não violar os limites do intervalo de variação dos contrastes-alvo de densidade, então teremos duas possibilidades. A primeira impõe que se a estimativa de p_j^k está contida na metade do intervalo

mais próxima de p_j^{alvo} (contraste-alvo de densidade do j -ésimo prisma), então, p_{oj}^k é substituído pelo valor de p_j^{alvo} . A segunda possibilidade impõe que se p_j^k estiver contido na metade do intervalo mais próxima de zero, então, p_{oj}^k é substituído por 0 g/cm^3 . Em ambos os casos, a j -ésima componente do vetor de correção dos parâmetros, Δp_j^k , não é forçada a ter um pequeno valor.

Estes critérios de penalização dos parâmetros, aplicados em cada iteração, garantem a evolução iterativa da solução e asseguram a incorporação da informação a priori disponível à estimativa.

Exemplo sintético com contraste de densidade variando em profundidade

A Figura 2a mostra a anomalia gravimétrica (linha contínua) corrompida com ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média zero e desvio padrão de 0,02 mGal. Os dados na superfície da Terra foram computados em uma grade de 10×10 nas direções x e y , com espaçamento de 0,9 km em ambas as direções. Esta anomalia foi produzida pela simulação de um domo de sal de $2,2 \text{ g/cm}^3$ incrustado em seis camadas de sedimentos com densidade variando de 1,95 a $2,39 \text{ g/cm}^3$ com a profundidade. Na profundidade de 1,5 km, o corpo de sal cruza a região chamada de "nil zone", onde os sedimentos e o sal têm a mesma densidade. A Figura 2b mostra que acima e abaixo da "nil zone", o corpo de sal apresenta, respectivamente, contrastes de densidade positivo e negativo.

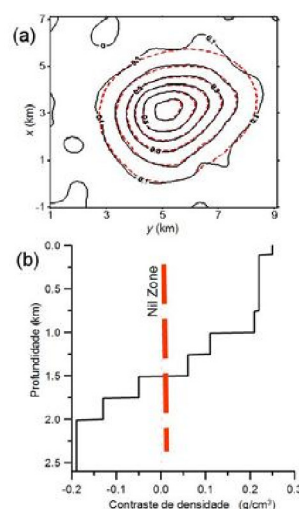


Figura 2 – Domo de sal sintético: (a) Anomalia sintética corrompida por ruído e anomalia ajustada (linhas pretas e vermelhas, respectivamente) produzida pela solução da inversão mostrada nas Figuras 3d-f. (b) Perfil dos contrastes de densidade entre o domo de sal homogêneo e as camadas sedimentares adjacentes ao sal.

Para recuperarmos o domo de sal, consideraremos que os sedimentos são homogêneos e o sal heterogêneo.

Desta forma estimaremos uma distribuição 3D reversa dos contrastes de densidade. Na quarta iteração do método IGAdapt, a estimativa 3D reversa (sal/sedimentos) da distribuição dos contrastes de densidade (Figura 3d-f) reconstruiu, com fidelidade, as principais feições da fonte verdadeira (Figura 3a-c) e produziu um ajuste aceitável da anomalia gravimétrica (linhas vermelhas na Figura 2a).

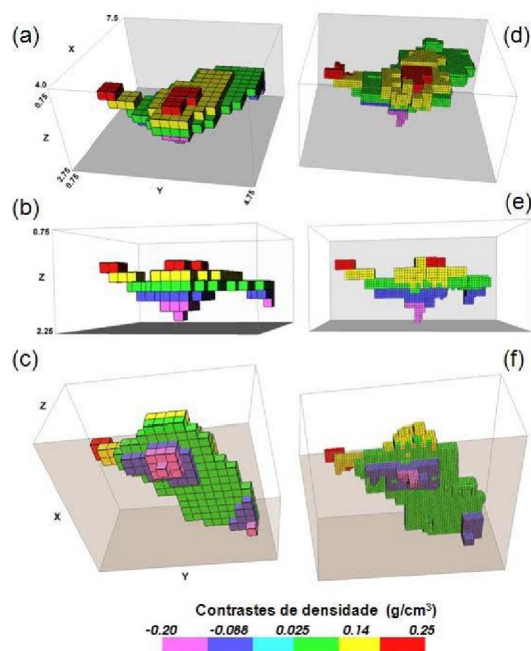


Figura 3 – Domo de sal sintético. Vistas em perspectiva da fonte verdadeira (a)-(c) e da estimativa da distribuição reversa (sal/sedimentos) dos contrastes de densidade na quarta iteração do método IGAdapt (d)-(f).

Aplicações a dados reais

O domo de sal de Galveston Island está localizado a 100 km ao sul de Galveston, Texas, no Golfo do México. A Figura 4a mostra a anomalia gravimétrica produzida pelo domo de sal e áreas adjacentes (Fueg, 1995; Fueg e Xia, 1996; Moraes & Hansen, 2001). A Figura 4b mostra a anomalia Bouguer sobre o domo de Galveston, corrigida dos efeitos crustais profundos. Usamos dois modelos estáticos para testar duas diferentes hipóteses geológicas. A primeira está baseada no modelo de densidade de Fueg (1995) e consiste de eixos, cruzando verticalmente as camadas sedimentares como representado nas Figuras 5a e 5b, e estão posicionados na região central da anomalia (pontos azul e verde, Figura 4b). O segundo modelo de referência estático é uma simplificação do modelo de Fueg (1995), consistindo em três eixos colineares e três pontos, cujas seções retas e localização no mapa são mostradas, respectivamente, nas Figuras 5c e 4b (ponto preto).

Usando o modelo geológico de referência representado nas Figuras 5a-b, a solução estimada da distribuição 3D

de contrastes de densidade (Figura 6) mostra um domo de sal alongado verticalmente com a base situada na profundidade de 5 km. Alternativamente, usando o modelo geológico representado na Figura 5c, o domo de sal estimado (Figura 7) mostra uma forma aproximadamente cilíndrica com a base situada na profundidade de 4 km. Adicionalmente, nesta estimativa nós interpretamos dois "overhangs" localizados nos flancos, a leste e a nordeste.

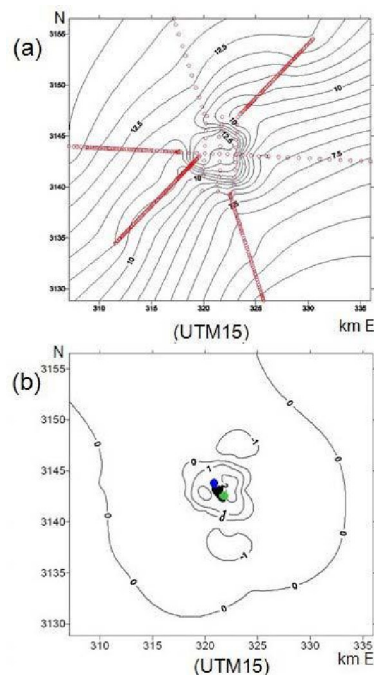


Figura 4 – Domo de sal de Galveston Island. (a) Mapa da anomalia Bouguer (mGal). Os pontos vermelhos localizam as estações no fundo marinho. (b) Mapa da anomalia Bouguer sobre o domo de Galveston, corrigida dos efeitos crustais profundos. Os três pontos centrais localizam os modelos geológicos de referência estáticos mostrados nos perfis verticais na Figura 5a-c.

Conclusões

Aplicamos a estratégia da aprendizagem adaptativa na inversão de anomalias gravimétricas, produzidas por corpos de sal com contrastes de densidade variando de valores positivos a negativos e cruzando, deste modo, a "nil zone".

O nosso método impõe que a distribuição 3D de contraste de densidade esteja próximo do valor nulo ou do contraste-alvo de densidade, maximizando a incorporação da informação a priori e eliminando, com este procedimento, a alternativa por outros métodos de otimização computacionalmente mais onerosos, tal como algoritmo genético. A nossa estimativa ajusta os dados dentro dos erros das observações e conduz à máxima compatibilidade das massas de sal em torno dos elementos

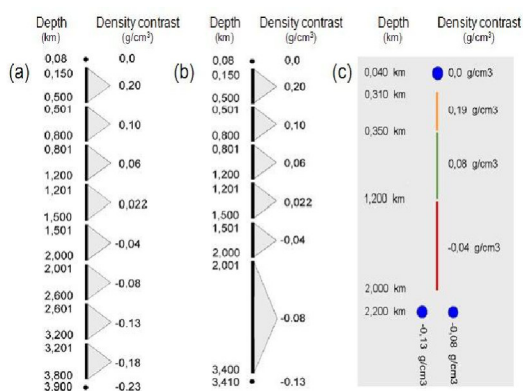


Figura 5 – Os modelos geológicos de referência estáticos mostrados em (a) e (b) são baseados no modelo de densidades de Fueg (1995), e uma simplificação deste modelo é mostrado em (c).

intérprete define um modelo de interpretação com um pequeno número de parâmetros e especifica um primeiro conjunto de elementos geométricos com seus correspondentes valores de contrastes-alvo de densidade.

Iterativa e automaticamente, o método expande o número de parâmetros a serem estimados e modifica o conjunto de elementos geométricos, baseado na distribuição 3D de contrastes de densidade estimada na iteração anterior.

Testes com dados sintéticos e reais mostram o bom desempenho do método no detalhamento da geometria complexa de corpos de sal. De modo mais geral, nosso método pode ser uma ferramenta valiosa para testar hipóteses geológicas sobre a tectônica do sal.

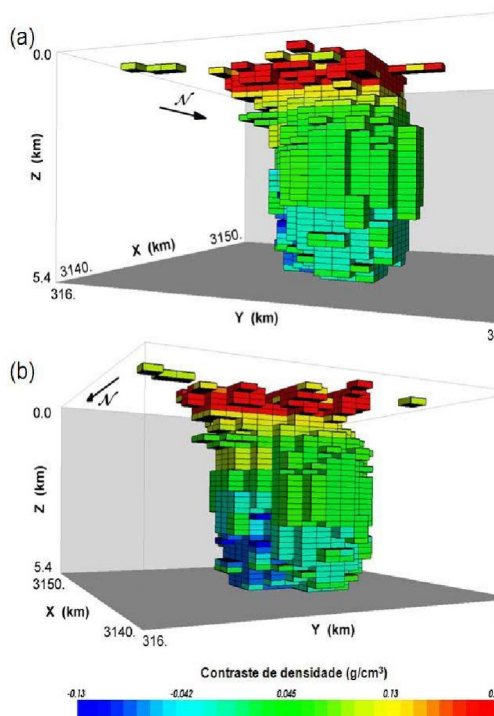


Figura 6 – Domo de sal de Galveston Island. (a) e (b) são diferentes visadas da distribuição do contraste de densidade estimada na segunda iteração do método IGAdapt, usando o modelo geológico de referência estático representado nas Figuras 5a e 5b.

geométricos especificados (eixos e pontos), que operam como o esqueleto estrutural dos corpos de sal. O

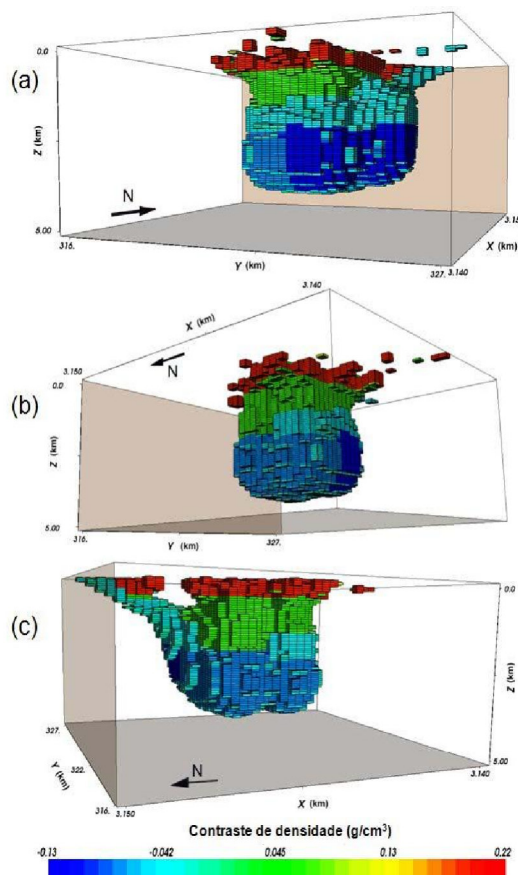


Figura 7 – Domo de sal de Galveston Island. (a), (b) e (c) são diferentes visadas em perspectiva da distribuição do contraste de densidade estimada na quarta iteração do método IGAdapt, usando o modelo geológico de referência estático simplificado representado na Figura 5c.

Referências

Barbosa, V.C.F. & J.B.C. Silva, 2006, Interactive 2D magnetic inversion: A tool for aiding forward modeling and testing geologic hypotheses: *Geophysics*, **71**, L43–L50.

Bear, G. W., J. Haydar & A. J. Rudman, 1995, Linear inversion of gravity data for 3-D density distributions: *Geophysics*, **60**, 1354–1364.

Fueg, J. E., 1995, Three dimensional gravity modeling of the Galveston Island salt dome in the Gulf of Mexico: M.S. thesis, Colorado School of Mines.

Fueg, J. E. & H. Xia, 1996, Estimation of salt base depth using 3D gravity modeling: a case history from the Northern Gulf of Mexico: 66th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1384-1386.

Huston, D. C., H. H. Huston & E. Johnson, 2004, Geostatistical integration of velocity cube and log data to constrain 3D gravity modeling, deepwater Gulf of Mexico: *The Leading Edge*, **23**, 842-846

Jorgensen, G., J. & J. L. Kisabeth, 2000, Joint 3D inversion of gravity, magnetic and tensor gravity fields for imaging salt formations in the deepwater Gulf of Mexico: 70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 424-426.

Krahenbuhl, R. A. & Y. Li, 2006, Inversion of gravity data using a binary formulation: *Geophysical Journal International*, **167**, 543–556.

Moraes, R. A. V. & R. O. Hansen, 2001, Constrained inversion of gravity fields for complex 3D structures: *Geophysics*, **66**, 501–510.

Nagihara, S. & S. A. Hall, 2001, Three-dimensional gravity inversion using simulated annealing: Constraints on the diapiric roots of allochthonous salt structures: *Geophysics*, **66**, 1438–1449.

Oezsen, R. 2004, Velocity modeling and prestack depth imaging below complex salt structures: a case history from on-shore Germany: *Geophysical Prospecting*, **52**, 693-705.

Routh, P. S., G. J. Jorgensen & J. L. Kisabeth, 2001, Base of the salt imaging using gravity and tensor Gravity data: 71th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1482–1484.

Silva Dias, F. J. S., V. C. F. Barbosa & J. B. C. Silva, 2007, 3D gravity inversion incorporating prior information through an adaptive learning procedure: 77th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 745–749.

Silva, J. B. C. & V. C. F. Barbosa, 2004, Generalized radial inversion of 2D potential field data: *Geophysics*, **69**, 1405–1413.

_____, 2006, Interactive gravity inversion: *Geophysics*, **59**, J1–J9.

Starich, P. J., G. G. Lewis, J. Faulkner & P. G. Standley, S. Setterquist, 1994, Integrated geophysical study of an onshore salt dome: *The Leading Edge*, **13**, 880-884

Yarger, H., L. DeKay & E. G. Hensel, 2001, Salt canopy modeling with gravity in deepwater Gulf of Mexico: 71th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1478–1482.

Agradecimentos

Agradecemos a Roberto A. V. Moraes e Richard O. Hansen pelos dados gravimétricos de Galveston Island. V.C.F. Barbosa e J.B.C. Silva agradecem o apoio financeiro recebido pelo CNPq via bolsa de pesquisa. Este trabalho foi financiado pelo CNPq (processo 471913/2007-3) e FAPERJ (processos E-26/100.688/2007 e E-26/110.961/2008)