

DELINEAMENTO SIMULTÂNEO DO RELEVO DO EMBASAMENTO E DE DIÁPIROS SALINOS EM PACOTES SEDIMENTARES COM DENSIDADE VARIANDO COM A PROFUNDIDADE ATRAVÉS DA GRAVIMETRIA

Darcicléa F. Santos¹ (UFPA), João Batista C. da Silva² (UFPA) e Valéria Cristina F. Barbosa³ (ON)

¹Univ. Federal do Pará – CG, Depto. de Geofísica, Caixa Postal 8608, Belém, Pa, e-mail: darci@ufpa.br

²Univ. Federal do Pará – CG, Depto. de Geofísica, C. Postal 8608, Belém, Pa, e-mail: joaobcsy@yahoo.com.br

³Observatório Nacional, Gal. José Cristino 77 CEP 20921400, Rio de Janeiro, RJ, e-mail: valcris@on.br

Apresentamos uma nova metodologia para delinear, através de dados gravimétricos, o ambiente geológico complexo de uma bacia sedimentar que apresenta relevo do embasamento descontínuo e cujo pacote sedimentar contém estruturas salinas. O processo da formação de domos e de soleiras de sal no pacote sedimentar propicia a formação de trapas para o acúmulo de hidrocarbonetos. Este ambiente geológico é bastante complexo para uma interpretação geofísica convencional, especialmente se o interesse reside em prospectar hidrocarbonetos nas camadas subjacentes à estrutura salina. Para inferir sobre a possível ocorrência de reservatórios localizados abaixo das estruturas salinas usa-se em geral o método sísmico. Entretanto, é necessário o conhecimento prévio aproximado de um modelo de velocidade. Tal modelo de velocidade pode vir a ser fornecido pela gravimetria a partir de estimativas das espessuras das estruturas salinas. Com essa finalidade, desenvolvemos um método que permite estimar simultaneamente o relevo do embasamento e a geometria das estruturas salinas. Para tanto a metodologia combina duas técnicas de inversão de dados gravimétricos 2D, que delinham tanto o relevo abrupto do embasamento de uma bacia sedimentar apresentando densidade variando com a profundidade como as geometrias complexas dos diápiros salinos. Os modelos interpretativos presumidos consistem em um conjunto de prismas bidimensionais verticais justapostos para o relevo do embasamento e prismas com seções verticais poligonais para as estruturas salinas. Para estabilizar a solução, incorporamos, através de estabilizadores matemáticos, informações geológicas sobre a geometria do relevo do embasamento e das estruturas salinas. Aplicamos o método em dados sintéticos e reais. Através de dados sintéticos, simulamos o ambiente geológico de uma bacia sedimentar 2D hipotética alongada na direção perpendicular ao perfil gravimétrico e que apresenta relevo descontínuo do embasamento e densidade do pacote sedimentar variando com a profundidade segundo uma lei hiperbólica. A bacia abriga uma soleira salina intra-sedimentar. O resultado mostrou que o método apresenta potencial para delinear, simultaneamente, as geometrias do domo salino e do relevo descontínuo do embasamento. Aplicamos o método também em dados reais ao longo de um perfil gravimétrico perpendicular à costa na região da Bacia de Campos. A interpretação mostrou a presença de falhas escalonadas, grabens e possíveis soleiras de sal.

Gravimetria-1, Inversão-2, Bacias Marginais-3, Regularização-4.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente geológico de uma bacia sedimentar contendo estruturas salinas pode estar associada a prováveis reservas de petróleo, tornando este ambiente promissor para a exploração de hidrocarbonetos. A presença do domo de sal em uma bacia sedimentar está relacionada ao movimento e à dissolução de depósitos salinos do início do Cretáceo, sendo as características das propriedades físicas do sal responsáveis por formação de trapas no pacote sedimentar. As propriedades físicas do sal tais como, a mobilidade, o calor específico elevado e a condutividade térmica três vezes maior que a dos sedimentos vizinhos torna o processo de formação das estruturas salinas responsável pela formação de trapas na região circunvizinha às estruturas salinas.

Na interpretação gravimétrica há métodos de inversão para delinear separadamente o relevo do embasamento descontínuo (Barbosa *et al.*, 1999) e para delinear o contorno geométrico de estruturas complexas semelhantes aos domos salinos (Silva e Barbosa, 2004). No entanto para o uso destes métodos, o intérprete necessita aplicar técnicas de separação regional-residual à anomalia gravimétrica, para separar o efeito gravimétrico produzido pelo embasamento do efeito gravimétrico produzido pelas estruturas sal.

A metodologia combina a técnica de inversão 2D de dados gravimétricos que delinea o relevo abrupto do embasamento de uma bacia sedimentar apresentando densidade variando com a profundidade com a técnica que permite estimar a geometria complexa dos diápiros e soleiras salinas. Para o relevo do embasamento, o modelo interpretativo consiste de um conjunto de prismas 2D verticais, retangulares e justapostos. Para as estruturas salinas o modelo interpretativo consiste de prismas 2D com seções verticais poligonais. Para estabilizar a

solução, incorporamos, através de estabilizadores matemáticos, a informação que o relevo do embasamento pode ser descontínuo e que as estruturas salinas têm contornos suaves e podem estar alongadas em direções pré-especificadas.

A eficiência do método é avaliada em dados sintéticos e reais. Os dados sintéticos provêm da simulação do ambiente geológico de uma bacia sedimentar 2D, cujo relevo do embasamento é descontínuo e cujo pacote sedimentar apresenta densidade variando com a profundidade segundo uma lei hiperbólica e abriga uma intrusão salina. O resultado mostrou que o método apresenta potencial para delinear, simultaneamente, as geometrias da estrutura salina e do relevo do embasamento descontínuo. Aplicamos o método também em dados reais ao longo de um perfil gravimétrico perpendicular à costa na região da Bacia de Campos. A interpretação mostrou a presença de falhas escalonadas, grabens e possíveis soleiras de sal.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os métodos de inversão gravimétrica desenvolvidos para interpretação de bacias sedimentares delineiam o relevo do embasamento supondo que o embasamento e o pacote sedimentar são homogêneos ou que apenas o embasamento é homogêneo e o pacote sedimentar apresenta densidade variando com a profundidade. Bott (1960) e Corbató (1965), por exemplo, desenvolveram métodos de inversão gravimétrica para estimar a interface separando dois meios homogêneos, ou seja, para mapear o relevo do embasamento de ambientes geológicos cujas densidades do embasamento e do pacote sedimentar são constantes. Por outro lado, Cordell (1973) e Chai e Hinze, (1988), Barbosa *et al.* (1999) e Silva *et al.* (2006), apresentaram métodos de interpretação gravimétrica para bacias sedimentares que apresentam o contraste de densidade do pacote sedimentar, em relação ao embasamento, aumentando com a profundidade. Barbosa *et al.* (1999) apresentaram um método estável que delinea o relevo descontínuo do embasamento. Por outro lado, Silva e Barbosa (2004) desenvolveram um método de inversão gravimétrica 2D que permite delinear o contorno geométrico de fontes geológicas complexas com densidade constante semelhantes à de estruturas salinas.

O ambiente geológico de uma bacia sedimentar contendo domo de sal apresenta duas dificuldades principais para a interpretação gravimétrica. A primeira é o fato de existirem fontes anômalas em pelo menos dois níveis de profundidade: uma fonte anômala originada pelo contraste lateral de densidade entre o embasamento e o pacote sedimentar e a outra devida ao contraste entre o sal e os sedimentos. A segunda dificuldade consiste no fato de a densidade dos sedimentos aumentar com a profundidade devido à compactação, enquanto o sal permanece com a densidade constante, complicando ainda mais a modelagem desse tipo de ambiente e reduzindo o sinal gravimétrico produzido pelo contraste entre sedimentos e embasamento.

A primeira dificuldade pode ser contornada através da separação prévia dos efeitos das fontes rasas e das profundas, seguida da interpretação gravimétrica individual de cada grupo de anomalia. Essa técnica é conhecida como separação regional-residual (Mallick e Sharma, 1999; Hearst e Morris, 2001; Beltrão *et al.*, 1991). Esta separação, por sua vez não pode ser empregada se as profundidades das fontes gravimétricas do relevo do embasamento e das estruturas salinas forem da mesma ordem de grandeza. Recentemente, Silva Dias *et al.* (2007) apresentaram um método de mapeamento do relevo do embasamento na presença de fontes residuais (e.g., estruturas salinas, intrusões de diabásio) sem a restrição feita pelas tradicionais técnicas de separação regional-residual sobre o conteúdo espectral de cada grupo de anomalia. Apesar de Silva Dias *et al.* (2007) contornarem o problema da impossibilidade da separação regional-residual, estes autores estimaram apenas o relevo do embasamento (fonte regional).

A segunda dificuldade tem sido atacada levando-se em conta, no modelo interpretativo, a variação de densidade dos sedimentos com a profundidade via procedimentos analíticos, mas aplicados a ambientes contendo apenas anomalias devidas ao relevo do embasamento (Rao *et al.*, 1993; Visweswara Rao *et al.*, 1994) ou procedimentos algorítmicos aplicados à modelagem e inversão apenas da anomalia produzida pela estrutura salina (Nagihara, S. e Hall, S. A., 2001).

Neste trabalho usamos a combinação dos modelos interpretativos definidos por Silva *et al.* (2006) e Silva e Barbosa (2004). O modelo interpretativo do relevo do embasamento definido por Silva *et al.* (2006) consiste de um conjunto de prismas verticais justapostos, desenvolvido a partir da extensão do método de Bott (1960), que considera apenas prismas homogêneos, para prismas com contraste de densidade aumentando com a profundidade segundo uma lei hiperbólica (Rao *et al.*, 1993). Já o modelo interpretativo das fontes salinas foi definido por Silva e Barbosa (2004) por um conjunto de prismas horizontais com seção poligonal arbitrária, cujos vértices são definidos em coordenadas polares.

3. METODOLOGIA

Seja \mathbf{g}^o o vetor de N-dimensional contendo os valores da anomalia gravimétrica observada ao longo da direção x sobre uma seção vertical no plano x - z , de uma bacia sedimentar genérica, aproximadamente 2D,

alongada na direção do eixo y de um sistema de coordenadas contendo fontes gravimétricas intra-sedimentares (Figura 1).

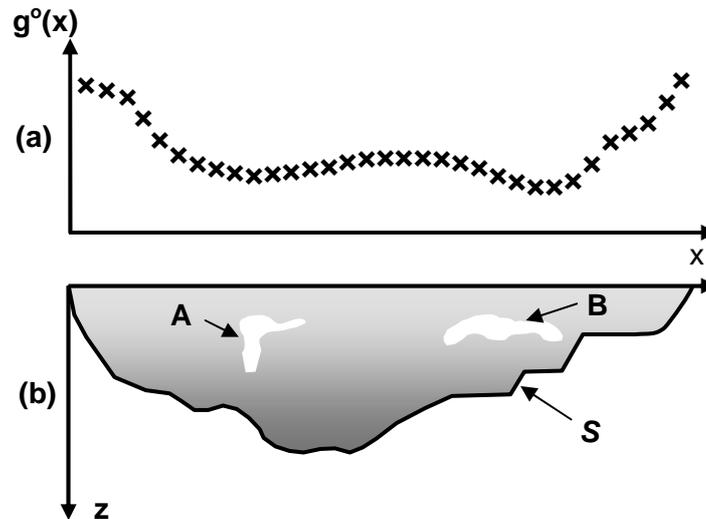


Figura 1 – Anomalia gravimétrica $g^{\circ}(x)$ (a) produzida pela bacia sedimentar apresentando pacote sedimentar com densidade variando com a profundidade (região cinza acima da linha S), pelas estruturas salinas (A e B) e pelo embasamento (região abaixo da linha S) com densidades constantes (b).

Para delinear simultaneamente a interface S, bem como as geometrias das estruturas salinas A e B, presumimos que (i) as estruturas salinas dentro do pacote sedimentar possuem densidade constante e conhecida; (ii) o embasamento é homogêneo com densidade conhecida; (iii) o contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento é conhecido, e diminui com a profundidade segundo uma lei hiperbólica (Litinsky, 1989), $\Delta\rho(z) = \Delta\rho_0\beta^2/(\beta+z)^2$ em que $\Delta\rho_0$ é o contraste de densidade na superfície e β é um fator de variação do contraste de densidade com a profundidade, expresso em unidade de comprimento. Tomamos a densidade do embasamento como densidade de referência para a definição dos contrastes de densidade do pacote sedimentar e de cada estrutura salina.

3.1 Modelo Interpretativo

Definimos o modelo interpretativo do ambiente geológico representado na Figura 1b por um conjunto de M prismas verticais justapostos (Figura 2), cujas espessuras são parâmetros a serem determinados, e por M_s prismas com seções verticais definidas por polígonos simples, P , de L lados cujos vértices são definidos por coordenadas polares (r, θ) , em que r é um vetor de raios e θ é um vetor de ângulos referidos à direção positiva do eixo x e considerados positivos quando medidos no sentido horário (Figura 3). As coordenadas r e θ definindo os vértices de cada polígono, são referidas a uma origem o , definida pelo ponto (x_o, z_o) pertencente ao interior do polígono simples, P . O vetor de raios r define parâmetros a serem determinados (Figura 3).

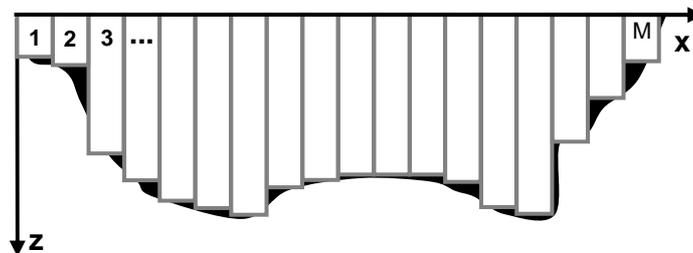


Figura 2 – Modelo interpretativo do relevo do embasamento consistindo de um conjunto de M prismas 2D retangulares verticais justapostos.

O modelo interpretativo da Figura 4b gera o vetor \mathbf{h} , N-dimensional, de observações gravimétricas teóricas (Figura 4a) em que o i-ésimo elemento produzido na i-ésima coordenada de observação (x_i) é dado por:

$$h_i \equiv h(x_i, \mathbf{q}, \Delta\rho^{(1)}, \Delta\rho^{(2)}) = g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho^{(1)}) + f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(2)}) - f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(1)}), \quad i=1,2,\dots,N, \quad (1)$$

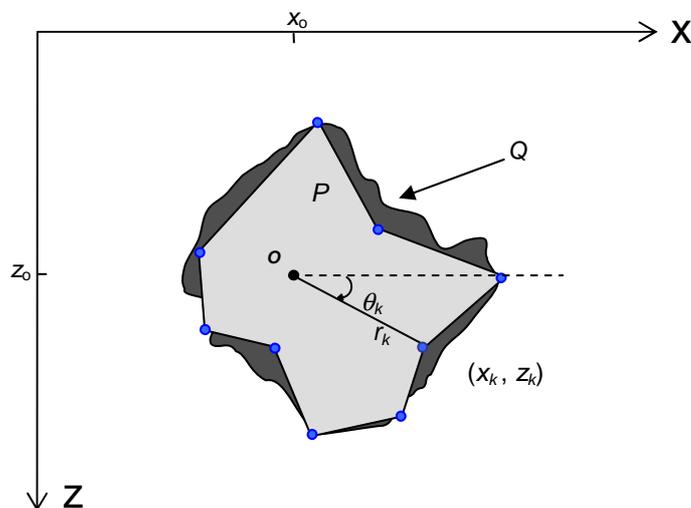


Figura 3 – Fonte anômala Q e modelo interpretativo consistindo de um polígono P em que o k -ésimo vértice é definido pela coordenada polar r_k e θ_k . A origem das coordenadas, o , deve pertencer ao interior do polígono e é definida pelo par de coordenadas cartesianas x_o e z_o .

em que $\mathbf{q} = [\mathbf{p} \ \mathbf{r}]^T$ é o vetor contendo todos os parâmetros a serem estimados, ou seja, as espessuras dos prismas contidas no vetor \mathbf{p} e todos os raios das seções poligonais, $\mathbf{r}^T = [\mathbf{r}^{(1)}, \mathbf{r}^{(2)}, \mathbf{r}^{(3)}, \dots, \mathbf{r}^{(M_s)}]$; o j -ésimo elemento, $\mathbf{r}^{(j)}$, de \mathbf{r} é o vetor de coordenadas radiais dos vértices do j -ésimo polígono que define a j -ésima estrutura salina; $\Delta\rho^{(1)}$ é o vetor contendo dois elementos, $\Delta\rho_0$ e β , que definem a lei hiperbólica acima mencionada; $\Delta\rho^{(2)}$ é o vetor M_s -dimensional dos contrastes de densidade de cada estrutura salina; $f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(1)})$ é a anomalia gravimétrica em $x = x_i$, produzida pela geometria das estruturas salinas, mas com contraste de densidade definido pela lei hiperbólica; $f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(2)})$ é a anomalia gravimétrica em $x = x_i$, produzida pelas estruturas salinas com contrastes de densidade dados pelos elementos do vetor $\Delta\rho^{(2)}$ e $g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho^{(1)})$ é a anomalia gravimétrica em $x = x_i$, produzida pelos M prismas que simulam o pacote sedimentar. O termo $f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(1)})$ na expressão (1) é necessário porque o termo $g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho^{(1)})$ inclui, no cálculo da anomalia, a contribuição de corpos com as geometrias das feições salinas, mas com contraste de densidade variando de acordo com a lei hiperbólica, que precisa ser removida para que o efeito das estruturas salinas não seja computado duas vezes. Os elementos do vetor $f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(2)})$ são calculados via método de Talwani (Talwani *et al.*, 1959) enquanto os elementos de $g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho^{(1)})$ e $f(x_i, \mathbf{r}, \Delta\rho^{(1)})$ são calculados usando a formulação matemática de Visweswara-Rao *et al.* (1994).

3.2 Determinação do Relevo do Embasamento e da Geometria das Estruturas Salinas

Os parâmetros \mathbf{q} são estimados através da minimização da norma da diferença entre os vetores contendo a anomalia gravimétrica observada, $\mathbf{g}^o(\mathbf{x})$, e a anomalia gravimétrica ajustada $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{q}, \Delta\rho^{(1)}, \Delta\rho^{(2)})$ em que \mathbf{x} é o vetor das coordenadas das observações. Sob a premissa que os vetores $\Delta\rho^{(1)}$ e $\Delta\rho^{(2)}$, e o ponto o (Figura 3), pertencente ao interior de cada estrutura salina são conhecidos, estimar \mathbf{q} através da minimização acima mencionada leva a um problema cuja solução é instável, de modo que é preciso estabilizá-la através da introdução de informação geológica a priori. Usaremos para tanto o método de regularização de Tikhonov (Tikhonov e Arsenin, 1977) em que informação a priori sobre os parâmetros \mathbf{p} e \mathbf{r} , será introduzida através do

estabelecimento de funcionais estabilizadores, Φ , que incorporam as classes de informação geológica a priori descritas a seguir.

(A) Suavidade global: Este funcional estabiliza a estimativa $\hat{\mathbf{p}}$ dos parâmetros que definem o relevo do embasamento introduzindo um grau de suavidade no relevo estimado. Ele foi definido por Barbosa *et al.* (1997)

como $\Phi^{(1)}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{M-1} (p_{i+1} - p_i)^2$. Analogamente, o funcional estabilizante da suavidade global pode também ser

incorporado às estimativas dos parâmetros $\hat{\mathbf{r}}^{(j)}$ definindo a j-ésima estrutura salina, em que presumimos (ou temos o conhecimento a priori) sobre a isometria destas fontes (Silva e Barbosa, 2004). Neste caso o funcional é

dado por $\Phi^{(2)}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^{M_s} \left[(r_{L_j}^{(j)} - r_1^{(j)})^2 + \sum_{k=1}^{L_j-1} (r_{k+1}^{(j)} - r_k^{(j)})^2 \right]$, em que M_s é o número de estruturas salinas, $r_k^{(j)}$ é o k-ésimo

elemento do vetor $\mathbf{r}^{(j)}$ que define a seção poligonal da j-ésima estrutura e L_j é o número de vértices da j-ésima estrutura salina.

(B) Suavidade ponderada: Este funcional é empregado no caso de embasamentos sujeitos a falhas de gravidade como no caso de uma bacia marginal, onde esforços tectônicos originam, no embasamento, um sistema de falhas escalonadas de grande rejeito. Este funcional foi introduzido por Barbosa *et al.* (1999) como a

combinação de $\Phi^{(3)}(\mathbf{p})$ e de $\Phi^{(4)}(\mathbf{p})$ associados ao vínculo D, em que $\Phi^{(3)}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{M-1} v_{ii}^2 (p_{i+1} - p_i)^2$ e

$\Phi^{(4)}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^M (p_i - p_{\max})^2$, sendo v_{ii} o i-ésimo elemento não nulo da matriz diagonal de pesos, \mathbf{V} , e p_{\max} a

profundidade máxima do relevo do embasamento, conhecida a priori. O elemento v_{ii} da matriz de pesos \mathbf{V} assinala menores peso aos pares de estimativas \hat{p}_{j+1} e \hat{p}_j associadas a regiões de descontinuidades abruptas do

relevo do embasamento. A matriz \mathbf{V} é definida de modo iterativo e automático sendo inicializada com a matriz identidade (i.e., $\Phi^{(3)}(\mathbf{p}) \equiv \Phi^{(1)}(\mathbf{p})$).

(C) Concentração de propriedade física anômala ao longo de direções preferenciais: Este funcional estabiliza, especificamente, as estimativas dos parâmetros $\hat{\mathbf{r}}^{(j)}$ definindo a j-ésima estrutura salina. Ele é aplicado a estruturas salinas que presumivelmente possuam formas geométricas complexas alongadas em direções preferenciais conhecidas a priori. Este funcional força, diferencialmente, as estimativas dos elementos de $\mathbf{r}^{(j)}$ a serem o mais próximo possível de um parâmetro $a_o^{(j)}$ (pré-estabelecido, para cada conjunto $\mathbf{r}^{(j)}$), através da

minimização do funcional $\Phi^{(5)}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^{M_s} \left[\sum_{k=1}^{L_j} (r_k^{(j)} - a_o^{(j)})^2 w_k^{(j)} \right]$ (Silva e Barbosa, 2004), sendo $w_k^{(j)}$, pesos

associados às direções ao longo das quais a j-ésima fonte presumivelmente se alonga. Pesos baixos ao longo de uma direção permite que as estimativas dos raios se afastem bastante de $a_o^{(j)}$, produzindo assim estruturas estimadas alongadas na direção escolhida.

Além destas informações a priori, a restrição abaixo é introduzida através de transformações homeomórficas (Barbosa *et al.*, 1999).

(D) Desigualdade: Este vínculo evita que as estimativas dos parâmetros $\hat{\mathbf{p}}$ e $\hat{\mathbf{r}}$ assumam valores fisicamente impossíveis. No caso de diápiros salinos ele evitará estimativas negativas das coordenadas z dos vértices dos polígonos do modelo interpretativo. Já para o relevo do embasamento evitará não só estimativas negativas (ou muito pequenas) das espessuras dos prismas ($< p_{\min}$) como também estimativas maiores que a profundidade máxima do relevo do embasamento, conhecida ou presumida a priori (p_{\max}).

O funcional estabilizador total $\Phi(\mathbf{q})$ é formado pela combinação dos funcionais estabilizadores (A), (B) e (C). A solução estável do vetor \mathbf{q} , contendo todos os parâmetros, é obtida minimizando-se o funcional,

$$\Phi(\mathbf{q}), \quad (2)$$

sujeito a

$$\|\mathbf{g}^o - \mathbf{h}(\mathbf{q})\| = \delta, \quad (3)$$

em que δ é uma estimativa do erro médio quadrático das realizações da variável aleatória que contamina as observações e $\mathbf{h}(\mathbf{q})$ é um vetor cujo i-ésimo elemento h_i é a anomalia teórica dada pela equação (1).

A solução desse problema é obtida via incorporação de funções-pênalti, sendo a função não vinculada, a ser minimizada, dada por

$$\tau(\mathbf{q}) = \|\mathbf{g}^0 - \mathbf{h}(\mathbf{q})\| + \mu_1 \sum_{i=1}^{M-1} v_{ii}^2 (p_{i+1} - p_i)^2 + \mu_2 \sum_{i=1}^M (p_i - p_{\max})^2 + \sum_{j=1}^{M_s} \left\{ \eta_j^{(1)} \left[(r_{L_j}^{(j)} - r_1^{(j)})^2 + \sum_{k=1}^{L_j-1} (r_{k+1}^{(j)} - r_k^{(j)})^2 \right] + \eta_j^{(2)} \left[\sum_{k=1}^{L_j} (r_k^{(j)} - a_o^{(j)})^2 w_k^{(j)} \right] \right\}, \quad (4)$$

em que $\mu_1, \mu_2, \eta_1^{(1)}, \dots, \eta_{M_s}^{(1)}, \eta_1^{(2)}, \dots, \eta_{M_s}^{(2)}$, são escalares não negativos escolhidos de modo a satisfazer a equação de vínculo (3) e a produzir soluções exibindo atributos geológicos realísticos. O minimante $\hat{\mathbf{q}}$ do funcional (4) é obtido através do método de Marquardt (Marquardt, 1963), empregando-se a aproximação de Gauss-Newton para a matriz Hessiana em cada iteração (Bard, 1974). Esta metodologia foi incorporada em um software com interface amigável no qual geramos todos os resultados apresentados neste trabalho.

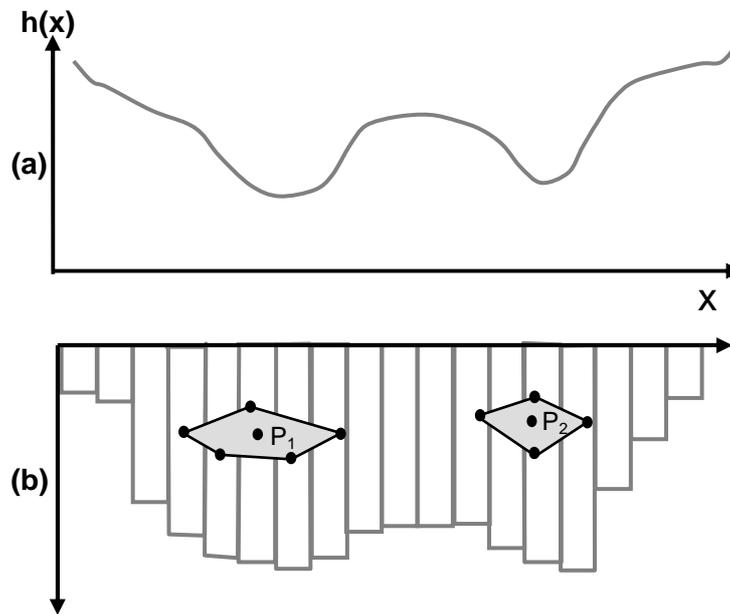


Figura 4 – Anomalia gravimétrica esquemática (a) produzida pelo modelo interpretativo do relevo do embasamento e pelas estruturas salinas, consistindo do conjunto de M prismas verticais e do conjunto dos raios que definem os vértices das poligonais P_1 e P_2 (b).

4. RESULTADOS

O método foi aplicado em dados sintéticos e dados reais:

4.1 Resultados em Dados Sintéticos

A anomalia Bouguer teórica (pontos pretos na Figura 5a) é devida à bacia sedimentar com relevo de embasamento descontínuo, contendo um domo salino com extensões vertical e horizontal de 0,8 km e 18 km, respectivamente (linhas contínuas pretas na Figura 5b). Esta anomalia foi contaminada com ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 0,1 mGal. Os seguintes valores foram usados na geração da anomalia sintética: $\Delta\rho_0 = -0,3 \text{ g/cm}^3$, $\beta = 5 \text{ km}$ e $\Delta\rho_1^{(2)} = -0,4 \text{ g/cm}^3$. O modelo interpretativo consiste de 80 prismas distribuídos no intervalo $x \in [0 \text{ km}, 60 \text{ km}]$ na direção E-W para o relevo do embasamento com e de três prismas horizontais com seções poligonais cujos vértices estão referidos a um sistema de coordenadas polar com origens em $(x_o^{(1)}, z_o^{(1)}) = (26,947 \text{ km}, 1,255 \text{ km})$, $(x_o^{(2)}, z_o^{(2)}) = (32,671 \text{ km}, 1,225 \text{ km})$ e $(x_o^{(3)}, z_o^{(3)}) = (38,473 \text{ km}, 1,239 \text{ km})$. Cada seção poligonal é descrita por 80 vértices (definidos por 80 raios). Na inversão incorporamos os vínculos (A), (B), (C) e (D) e usamos $\Delta\rho_0 = -0,3 \text{ g/cm}^3$, $\beta = 5 \text{ km}$, $\Delta\rho_1^{(2)} = -0,4 \text{ g/cm}^3$, $\mu_1 = 1,5$, $\mu_2 = 10^{-6}$, $p_{\max} = 4 \text{ km}$, $\eta_1^{(1)} = \eta_2^{(1)} = \eta_3^{(1)} = 0,05$, $\eta_1^{(2)} = \eta_2^{(2)} = \eta_3^{(2)} = 1,5$,

$a_o^{(1)} = a_o^{(3)} = 0,3$ km e $a_o^{(2)} = 0,4$ km. O relevo e as feições poligonais estimados na Figura 5b (linhas contínuas vermelhas) produzem um ajuste aceitável dos dados (linha contínua vermelha na Figura 5a), e aproximam-se, respectivamente, do relevo do embasamento e da geometria do domo salino mostrando a eficácia do método para ambientes geológicos contendo uma intrusão de estrutura salina e relevo descontínuo do embasamento.

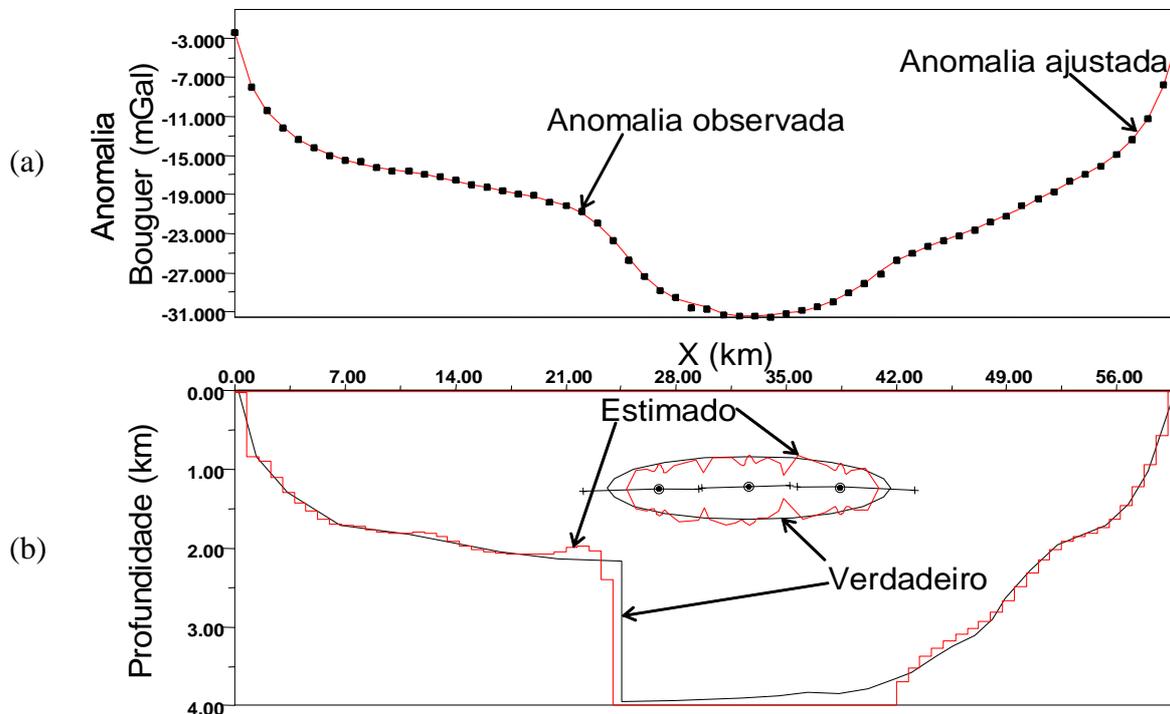


Figura 5 – Ambiente simulado. (a) Anomalias gravimétricas observada e ajustada. (b) Relevo do embasamento e contorno geométrico das estruturas verdadeiras (linhas pretas) e estimadas (linhas vermelhas). Os segmentos pretos originados nos círculos assinalam as direções preferenciais ao longo das quais a propriedade física anômala presumivelmente se concentra.

4.2 Resultados em Dados Reais

A Figura 6a mostra uma linha pontilhada preta referente ao perfil gravimétrico perpendicular à costa na região da Bacia de Campos que foi obtido no site “Data...” (http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi). Para realizar a correção gravimétrica produzida pela água salina utilizamos as informações batimétricas da região, disponíveis no mesmo site. As coordenadas geográficas dos extremos do perfil gravimétrico são 40° 49' 24" W, 21° 20' 17" S e 39° 47' W, 22° 37' 51" S. O modelo interpretativo para o relevo do embasamento consiste de 178 prismas, distribuídos no intervalo $x \in [8,27 \text{ km}, 192,44 \text{ km}]$ e, para as estruturas salinas, de seis prismas horizontais 2D com seções poligonais. Duas seções são definidas por 60 raios e origens do sistema de coordenadas em $(x_o^{(1)}, z_o^{(1)}) = (74,7 \text{ km}, 2,7 \text{ km})$ e $(x_o^{(2)}, z_o^{(2)}) = (79,8 \text{ km}, 2,7 \text{ km})$. Uma das seis seções é definida por 100 raios e origem do sistema de coordenadas em $(x_o^{(3)}, z_o^{(3)}) = (130,62 \text{ km}, 2,97 \text{ km})$ e as três restantes são definidas por 70 raios e origens do sistema de coordenadas em $(x_o^{(4)}, z_o^{(4)}) = (156,04 \text{ km}, 5,05 \text{ km})$, $(x_o^{(5)}, z_o^{(5)}) = (165,67 \text{ km}, 4,78 \text{ km})$ e $(x_o^{(6)}, z_o^{(6)}) = (180,08 \text{ km}, 5,05 \text{ km})$. Na inversão, incorporamos as informações a priori (A), (B), (C) e (D) e usamos $\Delta\rho_o = -0,35 \text{ g/cm}^3$, $\beta = 5 \text{ km}$, $\mu_1 = 0,1$ para $x \in [8,27 \text{ km}, 98 \text{ km}]$ com $p_{\max} = 4,5 \text{ km}$, $\mu_1 = 0,4$ para $x \in [99 \text{ km}, 143 \text{ km}]$ com $p_{\max} = 10 \text{ km}$, $\mu_1 = 0,3$ para $x \in [143,8 \text{ km}, 192,44 \text{ km}]$ com $p_{\max} = 10 \text{ km}$, $\mu_2 = 10^{-6}$, $\eta_1^{(1)} = \eta_2^{(1)} = \eta_3^{(1)} = \eta_4^{(1)} = \eta_5^{(1)} = \eta_6^{(1)} = 0,1$, $\eta_1^{(2)} = \eta_2^{(2)} = \eta_3^{(2)} = 0,5$, $\eta_4^{(2)} = \eta_5^{(2)} = 0,05$, $\eta_6^{(2)} = 0,1$, $\Delta\rho_1^{(2)} = \Delta\rho_2^{(2)} = \Delta\rho_3^{(2)} = \Delta\rho_4^{(2)} = \Delta\rho_5^{(2)} = \Delta\rho_6^{(2)} = -0,4 \text{ g/cm}^3$, $a_o^{(1)} = a_o^{(2)} = a_o^{(4)} = a_o^{(5)} = 0,5 \text{ km}$, $a_o^{(3)} = 1 \text{ km}$ e $a_o^{(6)} = 0,6 \text{ km}$. A solução estimada (linha contínua vermelha na Figura 6b) produz um ajuste aceitável dos dados (linha contínua vermelha na Figura 6a), indicando a presença de falhas escalonadas no relevo do embasamento e a presença de cinco possíveis estruturas salinas. As soleiras centradas nas posições $(x_o^{(1)}, z_o^{(1)}) = (74,7 \text{ km}, 2,7 \text{ km})$ e $(x_o^{(2)}, z_o^{(2)}) = (79,8 \text{ km}, 2,7 \text{ km})$ têm aproximadamente 11 km de extensão horizontal e 1,14 km de espessura. A soleira centrada na posição

$(x_o^{(3)}, z_o^{(3)}) = (130,62 \text{ km}, 2,97 \text{ km})$ tem aproximadamente 1,62 km de extensão horizontal e de 1,96 km espessura. A soleira centrada na posição $(x_o^{(4)}, z_o^{(4)}) = (156,04 \text{ km}, 5,05 \text{ km})$ tem aproximadamente 5,5 km de extensão horizontal e 2,69 km de espessura. A soleira centrada na posição $(x_o^{(5)}, z_o^{(5)}) = (165,67 \text{ km}, 4,78 \text{ km})$ tem aproximadamente 3,07 km de extensão horizontal e 2,43 km de espessura. A soleira centrada na posição $(x_o^{(6)}, z_o^{(6)}) = (180,08 \text{ km}, 5,05 \text{ km})$ tem aproximadamente 4,5 km de extensão horizontal e 2,34 km de espessura.

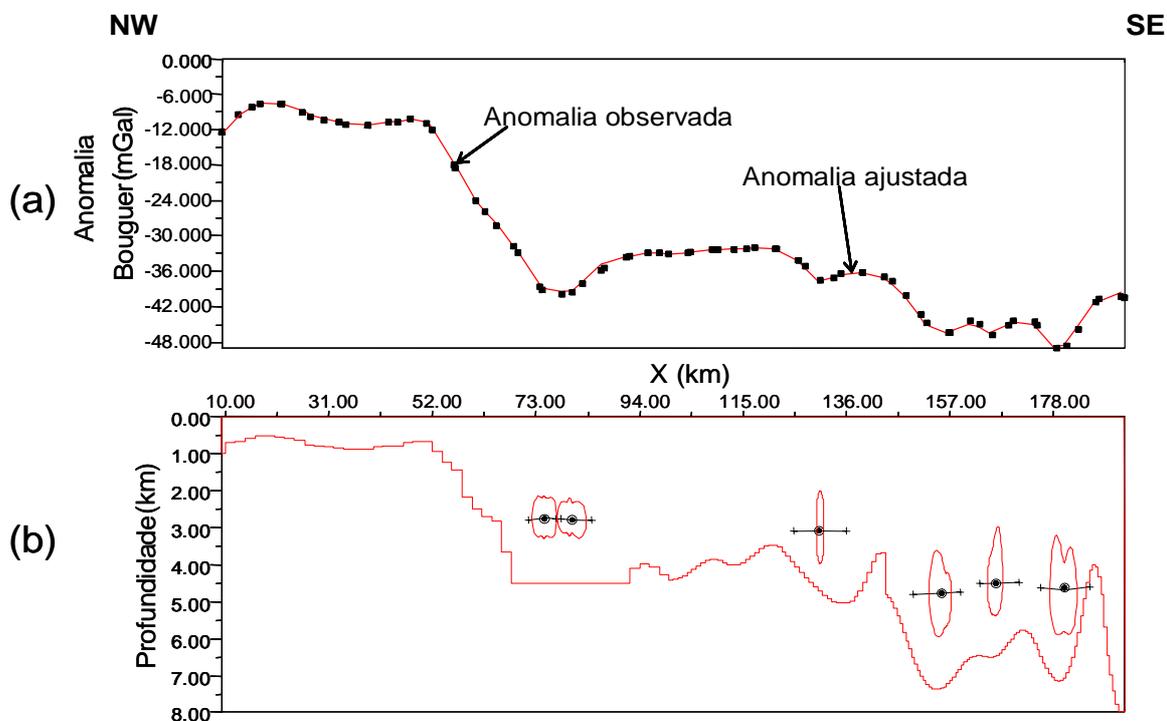


Figura 6 – Bacia de Campos. (a) Anomalias gravimétricas observada e ajustada. (b) Estimativas do relevo do embasamento e das geometrias de possíveis estruturas salinas. Os segmentos pretos originados nos círculos assinalam as direções preferenciais ao longo das quais a propriedade física anômala presumivelmente se concentra.

5. CONCLUSÃO

Desenvolvemos um método de interpretação gravimétrica para o ambiente geológico de bacias marginais, cujo pacote sedimentar apresenta densidade variando com a profundidade e contém estruturas salinas. O método combina duas técnicas de inversão pré-existentes, que foram usadas para delinear simultaneamente o relevo do embasamento e o contorno de fontes apresentando formas geométricas complexas.

Os modelos interpretativos consistem de (i) um conjunto de prismas verticais 2D justapostos que aproximam o pacote sedimentar e que apresentam um contraste de densidade com o embasamento conhecido, diminuindo com a profundidade segundo uma lei hiperbólica; (ii) um conjunto de prismas 2D com seções verticais poligonais que aproximam a geometria complexa das estruturas salinas intra-sedimentares e que apresentam contrastes de densidade com o embasamento, conhecidos e constantes, podendo variar de uma estrutura para outra.

Vínculos de proximidade relativa, de desigualdade, de suavidade ponderada e de concentração de propriedade física anômala ao longo de direções preferenciais foram usados para estabilizar a solução. Para testar a eficiência do método, simulamos uma bacia sedimentar, que apresenta relevo do embasamento descontínuo e contém uma estrutura salina. Os resultados em dados sintéticos mostraram que o método é promissor para delinear o relevo do embasamento e a forma geométrica de estruturas intra-sedimentares, permitindo assim um desacoplamento do efeito de fontes situadas em profundidades diferentes sem a necessidade e as restrições de uma prévia separação regional-residual. Aplicamos o método a dados reais de um perfil gravimétrico perpendicular à costa da Bacia de Campos produzindo uma interpretação que mostra a presença de falhas escalonadas, grabens e possíveis soleiras e domos de sal. O método foi incorporado em um software com interface amigável, e pode ser estendido para a inversão de anomalias magnéticas em ambientes geológicos similares.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao convênio UFPA-PRH-ANP-MCT-06 pelo suporte financeiro na forma de bolsa de estudos. J.B.C.S. e V.C.F.B agradecem o apoio financeiro recebido do CNPq via bolsas de pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depth. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.62, n.6, p.1745-1757, novembro-dezembro 1997.
- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. Gravity inversion of a discontinuous relief stabilized
- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. Gravity inversion of a discontinuous relief stabilized by weighted smoothness constraints on depth. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.64, n.5, p.1429-1437, setembro-outubro 1999.
- BARD, Y. **Nonlinear Parameter Estimation**. New York: Academic Press Inc., 1974. 341p.
- BELTRÃO, J. F.; SILVA, J. B. C.; COSTA, J. C. Robust polynomial fitting method for regional gravity estimation. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.56, n.1, p.80-89, janeiro 1991.
- BOTT, M. H. P. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**. Oxford: Blackwell Publishing, v.3, n.1, p.63–67, março 1960.
- CHAI, Y.; W. J. HINZE. Gravity inversion of an interface above which the density contrast varies exponentially with depth. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.53, n.6, p.837–845, junho 1988.
- CORBATO, C. E. A least-squares procedure for gravity interpretation. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.30, n.2, p.228-233, abril 1965.
- CORDELL, L. Gravity analysis using an exponential density-depth function — San Jacinto Graben, California. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.38, n.4, p.684–690, agosto 1973.
- DATA AQUISITION FORM. Disponível em: <http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi> Acesso em: 19 jan. 2007.
- HEARST, R. B.; MORRIS, W. A. Regional gravity setting of the Sudbury Structure. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.66, n.6, p.1680–1690, novembro-dezembro 2001.
- LITINSKY, V. A. Concept of effective density: Key to gravity determinations for sedimentary basins. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.54, n.11, p.1474-1482, novembro 1989.
- MALLICK, K.; SHARMA, K. K. A finite element method for computation of the regional gravity anomaly. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.64, n.2, p.461–469, março-abril 1999.
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**. Philadelphia: SIAM, v.11, n.2, p.431-441, junho 1963
- NAGIHARA, S.; HALL, S. A. Three-dimensional gravity inversion using simulated annealing: Constraints on the diapiric roots of allochthonous salt structures. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.66, n.5, p.1438–1449, setembro-outubro 2001.
- RAO, C. V.; CHAKRAVARTHI, V.; RAJU, M. L. Parabolic density function in sedimentary basin modeling. **Pure and Applied Geophysics**. Basileia: Birkhäuser Verlag, v.140, n.3, p.493-501, setembro 1993.
- SILVA DIAS, F. J. S.; BARBOSA, V.C.F.; SILVA, J.B.C. 2D gravity inversion of a complex interface in the presence of interfering sources. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.72, n.2, p.I13–I22, março-abril 2007.
- SILVA, J. B. C.; BARBOSA, V. C. F. Generalized radial inversion of 2D potential field data. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.69, n.6, p.1405-1413. novembro-dezembro 2004.
- SILVA, J. B. C.; COSTA, D. C. L.; BARBOSA, V. C. F. Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth. **Geophysics**. Tulsa: SEG, v.71, n.5, p.J51–J58, setembro-outubro 2006.
- TALWANI, M.; WORZEL, J.C.; LANDISMAN, M. Rapid gravity calculations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. **J. Geophys. Res.** Washington: AGU, v.64, n.1, p.49-59, janeiro 1959.
- TIKHONOV, A.N.; ARSENIN, V.Y. **Solutions of ill-posed problems**. Washington: V.H. Winston & Sons, 1977. 258p.
- VISWESWARA RAO, C.; CHAKRAVARTHI, V.; RAJU, M.L. Forward modelling: Gravity anomalies of two-dimensional bodies of arbitrary shape with hyperbolic and parabolic density functions. **Computers & Geosciences**. Amsterdam: Elsevier, v.20, n.5, p.873-880, junho 1994.

SIMULTANEOUS DELINEATION OF THE BASEMENT RELIEF AND OF SALT DIAPIRS WITHIN SEDIMENTARY BASINS, WHOSE DENSITY CONTRASTS VARY WITH DEPTH, USING GRAVITY DATA

We present a new gravity inversion method to delineate the discontinuous basement relief of a sedimentary basin, and the geometry of salt structures within the sedimentary pack. The emplacement of salt domes and sills favors the development of oil traps. This kind of geologic environment is extremely complex for a conventional geophysical interpretation, particularly if the main interest is in hydrocarbon prospecting within the sedimentary layers underlying the salt structures. Traditionally, the seismic method is employed in such environments, but it requires the a priori knowledge of an approximate velocity model. The gravity method, in this case, may help in establishing such approximate velocity model from the estimated thicknesses of the salt structures. In such context, we developed the present method, which combines two 2D gravity inversion techniques into a single method. The first one estimates a discontinuous basement relief of a sedimentary basin whose densities increase with depth. The second technique delineates the complex geometry of the salt domes and sills. The interpretation model for the basement relief consists of a set of 2D vertical, juxtaposed prisms. For the salt structures, the interpretation model consists of horizontal 2D prisms with polygonal cross. To stabilize the solutions, we introduce geological a priori information about the density contrasts and about overall geometrical characteristics of the basement relief and of the salt structures. The method was applied to synthetic data produced by a simulated 2D sedimentary basin elongated in a direction perpendicular to the gravity profile. The basement relief is discontinuous, and the density of the sediments increases with depth. Additionally, a salt sill intrudes the sediments. The results showed that the method is potentially of interest in simultaneously delineating the salt geometry and the discontinuous basement relief. We applied the method also to real data from a gravity profile perpendicular to the coastline offshore Campos Basin. The interpretation evidenced the presence of step faults, grabens, and possible salt sills.

*Gravimetry-1, Inversion-2, Rift Basins-3,
Regularization-4.*

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.