

## Evolução Termotectônica da Parte Oeste da Bacia de Campos.

Roberta A. Cardoso e Valiya M. Hamza, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

Apresenta-se neste trabalho resultados de estudos sobre a evolução termotectônica da parte oeste da Bacia de Campos, na região Sudeste. Na primeira etapa deste estudo os dados de temperatura do fundo do mar e de temperaturas de poços de exploração foram utilizados na determinação do campo térmico atual da bacia, em 97 localidades. Na segunda etapa os perfis litológicos de seis poços e as idades das principais formações geológicas foram utilizados na reconstrução das seqüências evolutivas da bacia (subsidiência tectônica) desde a sua formação, há 130 Ma. A elaboração das curvas de subsidiência termal foi efetuada com base no procedimento conhecido como "backstripping", no qual foi incorporado o processo de descompactação seqüencial dos sedimentos. Os resultados desta etapa foram ajustados aos modelos térmicos de subsidiência, permitindo a determinação das condições paleotermiais e o grau de estiramento da litosfera local. Há indícios de que a evolução da bacia ocorreu em duas fases distintas: a primeira entre 130 a 68 Ma e a segunda entre 68 Ma e o presente. Os graus de estiramento da litosfera variam de 1,4 a 1,9 para o primeiro estágio de subsidiência e de 1,2 a 1,5 para o segundo estágio. Os resultados indicam fluxo térmico na faixa de 75 a 95mW/m<sup>2</sup> no primeiro estágio, que é cerca de 30 a 50% superior aos valores atuais. As variações no fluxo geotérmico foram menos significativas no segundo estágio. Contudo, as avaliações da maturação térmica indicam que a geração de petróleo e gás ocorreu na fase final do segundo estágio, como consequência de soterramentos progressivos maiores.

### Introdução

O estudo da origem e do desenvolvimento de bacias sedimentares é de grande importância para o conhecimento dos movimentos verticais da crosta e do comportamento reológico da litosfera. Dependendo das condições de evolução geológica, as bacias podem hospedar jazidas minerais e reservatórios de hidrocarbonetos. A disponibilidade de dados geotérmicos e geológicos em escalas apropriadas permite a identificação deste potencial e aponta ainda áreas favoráveis à exploração de hidrocarbonetos. Uma das regiões onde a conjugação de dados propicia estudos desta natureza é a Bacia de Campos, localizado na plataforma continental da região Sudeste.

Foram propostos, então, estudos integrados de dados térmicos e litológicos de poços profundos localizados nessa bacia. A área de estudo selecionada é indicada na Figura (1). Corresponde à plataforma continental da parte oeste da Bacia de Campos, cuja extensão é de aproximadamente 100.000 km<sup>2</sup>, com uma área emersa relativamente pequena de 500 km<sup>2</sup>. O limite norte da bacia é definido pelo Alto de Vitória, que separa esta bacia da Bacia do Espírito Santo e o limite sul, pelo Alto de Cabo Frio, da Bacia de Santos (Rangel *et al*, 1994).

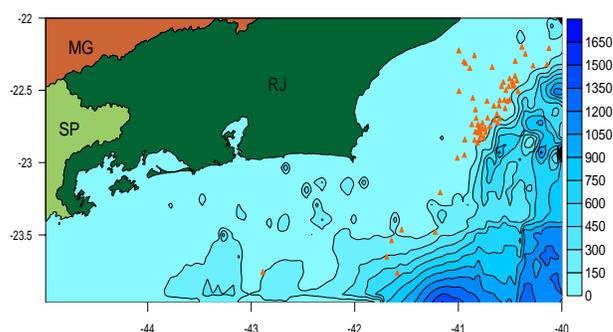


Figura (1) Mapa batimétrico da plataforma continental do estado do Rio de Janeiro. Os valores dos contornos estão em metros. Os triângulos indicam as localizações dos poços de exploração utilizados neste estudo.

Os estudos do presente trabalho foram desenvolvidos em duas etapas. Na primeira, foram adquiridos dados oceanográficos e temperaturas de fundo de poços de exploração (BHT). Análises destes dados permitiram a determinação de gradientes térmicos atuais da bacia (Cardoso e Hamza, 2003; 2004). Os estudos da segunda fase tiveram início em 2004 com a aquisição, junto à Agência Nacional do Petróleo (ANP), de relatórios geológicos com descrição de amostras de calha de seis poços exploratórios perfurados pela Petrobrás: RJS\_5B, RJS\_13, RJS\_23, RJS\_33, RJS\_70 e RJS\_99. Análises desses dados possibilitaram a construção da história de subsidiência da bacia. Apresentam-se neste trabalho uma síntese dos resultados obtidos sobre a evolução termotectônica da parte oeste da Bacia de Campos. Maiores detalhes de dados primários e resultados de modelagem computacional se encontram no trabalho recente por Cardoso (2005).

### Regime Térmico Atual

Os trabalhos da primeira fase tiveram como enfoque a avaliação do campo térmico atual da bacia de Campos. Foram determinados valores dos gradientes geotérmicos em 76 localidades. As determinações do fluxo geotérmico ( $q$ ) dos seis poços acima citados foram efetuadas com base no método BHT:

$$q = (T_{BHT} - T_{FM}) / \sum_{i=1}^N R_i Z_i \quad (1)$$

onde  $T_{BHT}$  é a temperatura do fundo do poço,  $T_{FM}$  a temperatura do fundo do mar,  $N$  o número de camadas,  $R_i$  a resistividade térmica da camada  $i$  e  $Z_i$  a sua espessura. O termo da somatória representa a resistência térmica cumulativa das formações até a profundidade de medida da temperatura. Os valores de fluxo geotérmico determinados estão na faixa de 53 a 63 mW/m<sup>2</sup>. As limitações na obtenção de amostras de sondagem e dos relatórios geológicos não permitiram as determinações de condutividade térmica para os 70 poços restantes. Desta forma, não foi possível usar o método BHT para a determinação do fluxo térmico dos mesmos.

Para contornar este problema foram examinadas as características das variações regionais do fluxo geotérmico. Neste contexto, notou-se que nas regiões de altos estruturais, onde a cobertura sedimentar é menos espessa, ocorrem aumentos localizados no fluxo de calor. Isso se dá pelos processos de refração de calor e efeito de manta térmica dos sedimentos. Deduz-se, portanto, que haveria uma correlação inversa entre a espessura dos sedimentos e o fluxo geotérmico. Assim, os dados disponíveis sobre a espessura de sedimentos pós-Cabiunas e o fluxo térmico de poços de referência foram utilizados na dedução da seguinte relação empírica:

$$q = 4.10^{-7} z^2 - 0,0056z + 73,175 \quad (2)$$

onde  $q$  é o fluxo térmico determinado pelo método BHT e  $z$  a espessura total de sedimentos em cada poço. Essa relação permitiu estimativas de fluxo geotérmico para as localidades dos demais poços. Os valores estimados estão na faixa de 52 a 64 mW/m<sup>2</sup>. Apresenta-se na Figura (2) o mapa elaborado com base nos valores calculados (representados por triângulos vermelhos) e estimados (círculos azuis) do fluxo geotérmico. As características de campo térmico reveladas neste mapa foram utilizadas como condições de contorno nos modelos de evolução termotectônica.

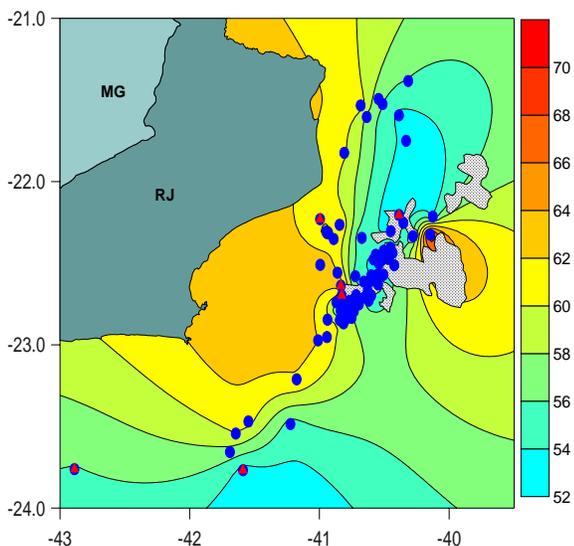


Figura (2) Mapa de fluxo geotérmico da Bacia de Campos. Os contornos estão em unidades de mW/m<sup>2</sup>. As áreas hachuradas indicam campos de petróleo.

## Evolução Termotectônica da Bacia

Nesta fase foram adotados procedimentos para a reconstrução da seqüência evolutiva da bacia. Os trabalhos foram realizados em etapas distintas visando a determinação da subsidência tectônica (isto é, o histórico de subsidência sob peso dos sedimentos) e subsidência termal (isto é, o movimento que o embasamento teria sofrido se a bacia fosse preenchida apenas por água). O conhecimento da subsidência termal permite ainda a determinação do fluxo térmico durante a evolução geológica da bacia. Apresentam-se nos itens seguintes breves descrições das metodologias adotadas e dos resultados obtidos. De modo geral o procedimento adotado é semelhante àquele empregado por Eston et al (1983).

**a) Subsidência Tectônica:** Nesta etapa o objetivo é a reconstituição dos movimentos verticais do embasamento e das camadas sedimentares sobrejacentes durante o período de evolução da bacia. Para isso recorreu-se à reconstrução das seqüências estratigráficas da bacia, conhecida também como procedimento de *Backstripping* (Steckler & Watts, 1978).

Na avaliação da subsidência tectônica é necessário adotar, inicialmente, um modelo de ajustamento isostático representativo do processo de evolução geológica em questão. Neste contexto, notamos que a fase inicial da evolução da Bacia de Campos ocorreu em consequência da separação entre as placas litosféricas da África e da América do Sul. Sendo o rifteamento o processo geológico principal que originou a bacia, o mecanismo de ajustamento isostático mais indicado é do tipo Airy. A suposição básica é que a litosfera não possui rigidez flexural, o que implica na falta de resistência ao cisalhamento vertical, admitindo, assim, compensação isostática em escala local.

O procedimento de *backstripping* consiste na determinação das espessuras, densidades e porosidades originais das camadas sedimentares, além de fornecer dados sobre as paleopropriedades das formações. Na determinação da espessura original de cada camada, utilizou-se a relação (Sclater e Christie, 1980):

$$Z'_2 = (Z_2 - Z_1) - \left(\frac{f_0}{c}\right)(e^{-cZ_1} - e^{-cZ_2}) + \left(\frac{f_0}{c}\right)(e^{-cZ'_1} - e^{-cZ'_2}) \quad (3)$$

Nesta equação  $Z_1$  e  $Z_2$  são topo e base atuais da camada,  $Z'_1$  e  $Z'_2$  são topo e base originais,  $f_0$  a porosidade inicial e  $c$  uma constante. Em outras palavras,  $Z'_1$  representa o topo da camada após a descompactação, enquanto  $Z'_2$ , a base da mesma camada após a descompactação. O termo  $(Z'_2 - Z'_1)$  pode, então, ser interpretado como sendo a espessura original desta camada após a "retirada" da camada superior. Neste processo ocorrem também mudanças na porosidade e na densidade das camadas inferiores que devem ser recalculadas a cada estágio da descompactação, notando-se que a base da camada após a descompactação ( $Z'_2$ ) é equivalente ao topo da camada subjacente. Temos então, para o cálculo da porosidade e densidade, respectivamente:

$$f' = \frac{\left(\frac{f_0}{c}\right)(e^{-cz_1} - e^{-cz_2})}{(Z'_2 - Z'_1)} \quad (4)$$

$$\rho'_s = f' \rho_w + (1 - f') \rho_g \quad (5)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água e  $\rho_g$  a densidade da matriz sólida constituída por grãos minerais. A tabela (1) apresenta como exemplo os resultados dos estágios da descompactação com base em resultados do poço RJS\_13. Nela constam as variações de espessura, porosidade e densidade ao longo da sedimentação da bacia, resultantes da descompactação dos sedimentos. Observa-se uma diminuição na espessura e porosidade e um aumento na densidade das formações geológicas, com o tempo após o estiramento inicial ocorrido na bacia.

Tabela 1: Variações na espessura, porosidade e densidade nas formações geológicas da bacia de Campos, ao longo da sua história de sedimentação.

| a) Variação na Espessura (m) |            |     |     |     |
|------------------------------|------------|-----|-----|-----|
| Formação                     | Idade (Ma) |     |     |     |
|                              | 0          | 68  | 90  | 108 |
| Emborê                       | 936        | -   | -   | -   |
| Mb Siri                      | 759        | 838 | -   | -   |
| Macaé                        | 801        | 839 | 887 | -   |
| Lagoa Feia                   | 669        | 696 | 728 | 779 |

| b) Variação na Porosidade (%) |            |    |    |     |
|-------------------------------|------------|----|----|-----|
| Formação                      | Idade (Ma) |    |    |     |
|                               | 0          | 68 | 90 | 108 |
| Emborê                        | 28         | -  | -  | -   |
| Mb Siri                       | 22         | 31 | -  | -   |
| Macaé                         | 14         | 19 | 24 | -   |
| Lagoa Feia                    | 13         | 16 | 21 | 27  |

| c) Variação na Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |            |      |      |      |
|---|------------|------|------|------|
| Formação                                      | Idade (Ma) |      |      |      |
|   | 0          | 68   | 90   | 108  |
| Emborê  | 2.68       | -    | -    | -    |
| Mb Siri                                       | 2.71       | 2.26 | -    | -    |
| Macaé   | 2.61       | 2.26 | 2.26 | -    |
| Lagoa Feia                                    | 2.63       | 2.35 | 2.35 | 2.25 |

Os dados resultantes do processo de descompactação de sedimentos permitiram o cálculo de taxas de subsidência tectônica. A taxa média de subsidência da bacia é 24m/Ma. Foram calculadas também as taxas de subsidência das formações geológicas, que apresentaram valores na faixa de 19 a 46m/Ma. As maiores taxas de subsidência de 45 e 46m/Ma foram associadas às formações Lagoa Feia e Campos, respectivamente.

**b) Subsidência Termal:** O conhecimento da subsidência termal permite obtenção de informações sobre a natureza dos processos térmicos. O ajuste aos dados de subsidência termal permite a determinação do parâmetro térmico de subsidência ( $\gamma$ ). Este parâmetro está relacionado com o grau de estiramento da litosfera ( $\beta$ ):

$$\gamma = 1 - (1/\beta) \quad (6)$$

No presente caso, adotou-se o modelo proposto por McKenzie (1978), que estabelece um estiramento horizontal instantâneo e homogêneo. O afinamento da

crosta ocorre em consequência da subida da astenosfera quente. A compensação isostática resulta em subsidência por falhamentos do segmento rúptil da crosta.

Os dados de subsidência termal foram utilizados na determinação de elevação do embasamento  $e(t)$ :

$$e(t) = \left(\frac{a\rho_m\alpha\pi}{\rho_m - \rho_w}\right) \frac{4}{\pi^2} \left[\left(\frac{\beta}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{\beta}\right) e^{-\frac{t}{\tau}}\right] \quad (7)$$

no qual  $a$  é a espessura da litosfera  $t$  o tempo após o estiramento inicial e  $\tau$  o tempo característico da litosfera, este último dado por:

$$\tau = \frac{a^2}{\pi^2 \kappa} \quad (8)$$

sendo que  $\kappa$  é a difusividade térmica da litosfera.

A subsidência termal é determinada utilizando a relação:

$$S_t = \left[\frac{(\rho_m - \rho_s)}{(\rho_m - \rho_w)}\right] S \quad (9)$$

onde  $S_t$  é a subsidência termal e  $S$  a espessura total da coluna sedimentar após a descompactação. A relação entre a subsidência termal e o parâmetro térmico  $\gamma$  é dada por:

$$e(t) = S(t) - e(0) \quad (10)$$

Na equação (10)  $e(0)$  representa a elevação do embasamento da bacia acima do nível final de equilíbrio térmico.

A Figura (3) apresenta como exemplo as curvas de subsidência tectônica do embasamento do poço RJS\_13, além das curvas de subsidência termal obtidas pelas equações (9) e (10). Junto à curva de subsidência termal estão apresentados os valores do grau de estiramento, obtidos pelo ajuste dos dados de subsidência termal. Observa-se neste exemplo, uma diminuição do grau de extensão ao longo da história da bacia e uma maior subsidência sofrida pelo embasamento quando o grau de estiramento é maior. Por exemplo, o grau de estiramento inicial de 1,62 está associado a uma subsidência de 735 metros em um período de 40 milhões de anos, enquanto na fase mais recente correu uma subsidência de 411 metros, para um grau de estiramento de 1.2.

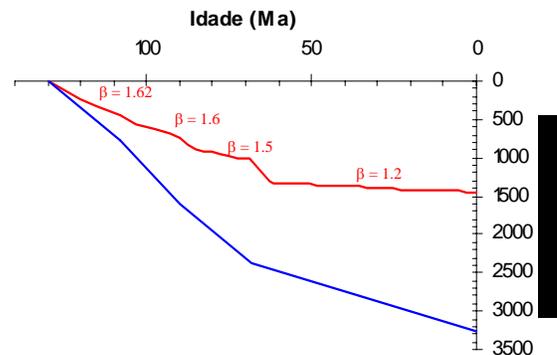


Figura (3) Curvas de subsidências termal (vermelho) e tectônica (azul) para o local do poço RJS\_13. Nota-se o decréscimo sistemático no fator de estiramento.

A variação dos valores de grau de estiramento para os seis poços estudados é apresentada na Figura (4). Observa-se que a extensão litosférica não é homogênea em toda a bacia e ao longo do tempo geológico. Valores mais elevados são observados na fase inicial de subsidência.

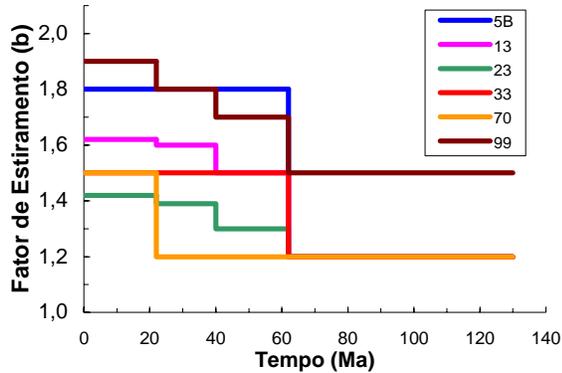


Figura (4) Variação do grau de extensão ( $\beta$ ) ao longo da história de subsidência da Bacia de Campos, para os seis poços estudados.

**c) Paleo Fluxo Geotérmico:** Os valores de fluxo geotérmico do período da evolução da bacia foram calculados utilizando a relação (McKenzie, 1978):

$$q_p(t) = \lambda T_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{\beta}{n\pi} \right) \left( \frac{\sin n\pi}{\beta} \right) e^{-n^2 \left( \frac{t}{\tau} \right)} \right\} \quad (11)$$

onde  $\lambda$  é a condutividade térmica do embasamento,  $T_1$  a temperatura na base da litosfera,  $\beta$  o fator de estiramento.

A variação do fluxo geotérmico ao longo da história de subsidência da bacia é apresentada na Figura (5). A diminuição do fluxo térmico ao longo do tempo geológico indica a dissipação gradativa da anomalia térmica, gerada no período do rifteamento.

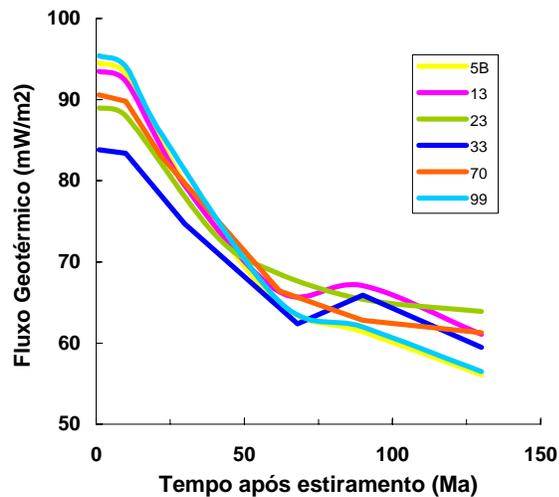


Figura (5) Dissipação gradativa da anomalia térmica gerada no rifteamento, representada pela diminuição do fluxo térmico ao longo da subsidência da bacia.

A análise conjunta das curvas de subsidência termal e de paleofluxo de cada poço indicou um decréscimo dos valores de fluxo térmico quando há uma diminuição no grau de estiramento. McKenzie (1978) propõe que para graus de estiramento menores que 1,5, as variações ocorridas no fluxo térmico são pouco significativas. Por exemplo, no poço RJS\_13 (Figura 6), observa-se uma variação de  $30 \text{ mW/m}^2$  para um grau de estiramento inicial de 1.62; quando este parâmetro decai para 1.2, a variação do fluxo térmico é menor que  $10 \text{ mW/m}^2$ .

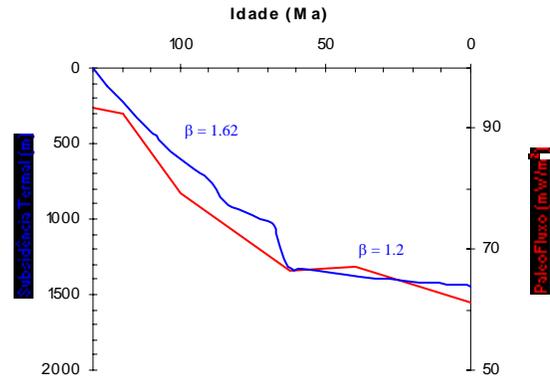


Figura (6) Variações no fluxo geotérmico e subsidência termal no local do Poço RJS\_0013.

### Conclusões

O processo de descompactação de sedimentos possibilitou a determinação das espessuras, porosidades e densidades originais das formações geológicas da bacia.

O comportamento das curvas de subsidência termal observado possibilitou a identificação da existência de dois estágios de subsidência na bacia de Campos.

O primeiro estágio, com início no rifteamento entre as placas Africana e Sul-Americana, há 130 Ma é caracterizado por apresentar maior grau de estiramento (entre 1.42 e 1.9) e taxa de subsidência de 45 m/Ma.

O mapa de extensão litosférica apresentado na Figura (7) foi elaborado com os dados de graus de estiramento do primeiro estágio, dos seis poços. A figura indica valores relativamente mais elevados na parte leste da bacia, ou seja, mais próximo à abertura do rifte e valores mais baixos, na parte oeste, em direção ao continente. Ainda neste primeiro estágio foram observadas pequenas atenuações da subsidência, que possibilitaram a divisão deste estágio em duas fases secundárias (Figura 4). Há indícios de que as fases ocorreram a 20 e 40 milhões de anos após o estiramento inicial.

O segundo estágio, com início há 68 Ma, apresenta grau de estiramento entre 1.2 e 1.5, com taxa de sedimentação de 46 m/Ma. Neste caso, não foram observadas fases secundárias tão marcantes como do primeiro estágio.

O grau de estiramento litosférico assim como o fluxo térmico apresentam valores mais elevados na fase inicial da subsidência da bacia. Apesar desta observação, a maturação das camadas deve ter alcançado seu índice máximo no final do segundo estágio de subsidência. Isto se deve às maiores temperaturas encontradas nestas camadas, devido ao aumento nas suas profundidades.

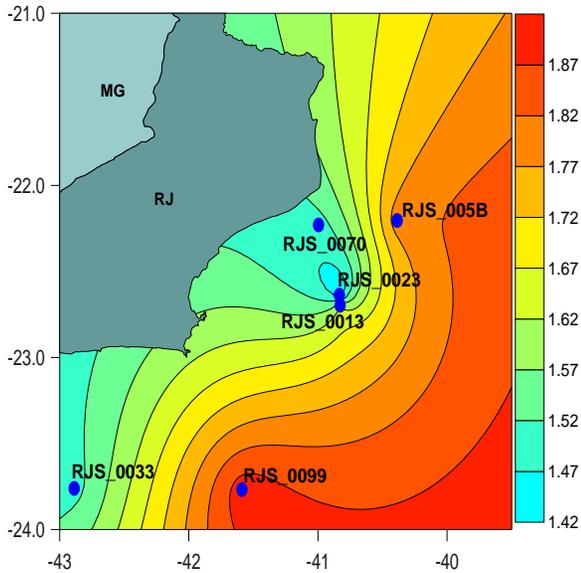


Figura 7: Mapa de extensão litosférica do primeiro estágio de subsidência da bacia de Campos, há 130 Ma. Os isovalores correspondem aos valores do grau de estiramento ( $\beta$ ).

#### Agradecimentos

Agradecemos a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira (DHN) pelos dados oceanográficos cedidos.

A Agência Nacional de Petróleo (ANP) concedeu dados de temperaturas de seis poços e respectivos relatórios geológicos.

O primeiro autor deste trabalho recebeu bolsa de Iniciação Científica pelo programa PIBIC.

Trabalho realizado sem auxílio das entidades nacionais de fomento à Pesquisa.

#### Referências Bibliográficas

**Bender, A.A. Mello, U.T. e Kiang, C.H.** 1989. *Reconstituição bidimensional da história geológica de bacias sedimentares – teoria e uma aplicação na Bacia de Campos*. Bol. Geoc. Petrobrás, Rio de Janeiro, 3 (1/2): 67-85, jan/jul.

**Bruhn, C.H.L., Cainelli, C. e Matos, R.M.D.** 1988. *Habitat do Petróleo e Fronteiras Exploratórias nos Rifts Brasileiros*. Bol. Geoc. Petrobrás, Rio de Janeiro, 2(2/4): 217-253.

**Chang, H.K.; Bender, A.A. e Mello, U.T.** 1990. *Origem e evolução termomecânica de bacias sedimentares*. In: Raja Gabaglia, G.P e Milani, E.J. eds., *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*; Petrobrás, p 49-71.

**Cardoso, R.A.** 2005. *Estudo da evolução tectônica e história térmica da plataforma continental do estado do Rio de Janeiro*. Monografia de graduação. UERJ.

**Cardoso, R.A e Hamza, V.M.** 2003. *Gradiente e fluxo geotérmico da plataforma continental da região sudeste do Brasil*. 8º Congresso Internacional da Soc Bras de Geofísica. Rio de Janeiro/RJ.

**Cardoso, R.A. e Hamza, V.M.** 2004. *Fluxo geotérmico e história de subsidência da parte oeste da Bacia de Campos – Implicações para geração de hidrocarbonetos*. XLII Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá/MG.

**Dias, J.L., Scarton, J.C., Esteves, F.R., Carminatti, M. e Guardado, L.R.** 1990. *Aspectos da Evolução Tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos*. In: Raja Gabaglia, G.P e Milani, E.J. eds., *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*; Petrobrás, p 333-360.

**Eston, S.M., Hamza, V.M., Becker, E.A. e Furumoto, S.** 1983. *Pesquisas Geotérmicas na exploração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná, Relatório Interno*, Inst. Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo.

**Rangel, H.D., Martins, F.A.L., Esteves, F.R., Feijó, F.J.** 1994. *Bacia de Campos*. Bol. Geoc. Petrobrás, Rio de Janeiro, 8(1): 203-217.

**McKenzie, D.** 1978. *Some remarks on the development of sedimentary basins*. Earth and planetary Science Letters, 40, 25-32.

**Quintas, M.C.L, Mantovani, M.S.M. e Zalán, P.V.** 1997. *Contribuição para o estudo da evolução mecânica da bacia do Paraná*. Bol Geoc Petrobrás, RJ, 11(1/2): 48-73;

**Rangel, H.D., Martins, F.A.L., Esteves, F.R., Feijó, F.J.** 1994. *Bacia de Campos*. Bol. Geoc. Petrobrás, Rio de Janeiro, 8(1): 203-217.

**Sclater, J.G., Christie, P.A.F.** 1980. *Continental stretching: an explanation of the pre-mid-cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin*. Journal of Geophys. Res. V. 85, nB7, p.37111-3739.

**Steckler, M.S. e Watts, A.B.** 1978. *Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York*. Earth and Planetary Science Letters, Amsterdam, 42(1):1-3.jan.