



Campo Térmico da Crosta na Região Sedimentar Bahia Sul e na Área Precambriana Adjacente: Reavaliação com base em dados corrigidos da Margem Continental

Martha V. Gutierrez e Valiya M. Hamza, Observatório Nacional – ON/MCT, Rio de Janeiro

Copyright 2009, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

Bottom-hole temperatures (BHT) measured in oil exploration wells has been used in determining geothermal gradients in the South Bahia region. The results indicate a mean gradient value of $29,7 \pm 2,8$ °C/km, in reasonable agreement with the results of Cavalcante et al (2004), but nearly 50% less than the value of $52,9 \pm 1,7$ °C/km derived from data reported in a recent study (Silva, 2006). The corrected data set has been used, in conjunction with the gradient values for localities in the adjacent land regions in deriving the first geothermal map of the state of Bahia. This map reveals that gradient values are relatively low in the cratonic areas and in Precambrian fold belts, compared with those in areas of sedimentary basins. Within the South Bahia region the southern parts are characterized by higher gradients relative to those of the northern parts. Results of model studies reveal that Curie isotherm may be encountered at depths of 15 to 25km, depending on the local values of temperature gradient and of radiogenic heat production rate in the upper crust. The results also reveal that thermal maturation levels of hydrocarbons occur at depths of 3 to 4km.

Introdução

As características térmicas das camadas sub-superficiais desempenham papéis importantes nos processos tectônicos responsáveis pelos movimentos verticais da crosta terrestre (soerguimento e subsidência). O campo de temperaturas também é de suma importância na avaliação da maturação térmica de hidrocarbonetos. Por conseguinte, o conhecimento da estrutura termal das bacias sedimentares é fundamental na exploração de jazidas de petróleo.

Os resultados das investigações geotérmicas realizadas nas últimas décadas serviram de base em diversos estudos de avaliação do campo térmico regional da crosta no território brasileiro (Meister, 1973; Hamza et al, 1984 e Hamza e Muñoz, 1996). De acordo com a compilação efetuada por Hamza et al (2005) as áreas Pré-Cambrianas são caracterizadas por gradientes térmicos médios na faixa de 10 a 25°C/km. Por outro lado, as bacias sedimentares de idades menores (períodos de Paleozoico e Mesozóico) são caracterizadas por gradientes térmicos relativamente maiores, porém seus valores médios não ultrapassam 30°C/km. Esse

comportamento do campo térmico é típico de áreas tectonicamente estáveis, como é caso do segmento leste do continente Sul-Americano.

No entanto, num trabalho acadêmico, concluído recentemente, foram relatadas ocorrências de gradientes térmicos superiores a 50°C/km na região Bahia Sul (Silva, 2006), onde estão situadas as bacias sedimentares de Camamu, Almada, Jequitinhonha e Cumuruxatiba. Os resultados foram interpretados por Silva (2006) como indicativo de existência de zonas termicamente anômalas na crosta local, correlacionadas com os resultados de levantamentos magnéticos de alta resolução. Consequentemente, a isoterma de Curie estaria em profundidades relativamente rasas (<15 km) na crosta local.

Neste contexto, o enfoque do presente trabalho é direcionado para uma reavaliação criteriosa dos dados geotérmicos da região Bahia Sul visando mapeamento do gradiente térmico das áreas situadas no segmento central da margem continental Brasileira. O escopo do trabalho inclui também integração dos dados das áreas continentais adjacentes, objetivando uma interpretação, da estrutura termal da crosta nesta região.

Bases de Dados

Os dados relatados no trabalho acadêmico de Silva (2006) apresentaram diversas inconsistências no que diz a respeito à identificação e a localização dos poços. Outro fator agravante é a deficiência de informações detalhadas sobre os procedimentos utilizados nas determinações das temperaturas de fundo dos poços (BHT) e cálculos dos gradientes térmicos. Há indícios de que ocorreram erros na conversão de unidades de temperaturas. Análises detalhadas dos dados indicam possíveis ocorrências de erros também na transcrição de dados de temperaturas. Outra dificuldade se refere aos valores de temperaturas do fundo do mar utilizados nos cálculos dos gradientes térmicos. Problemas desta natureza inviabilizaram aproveitamento pleno dos dados constantes no trabalho realizado por Silva (2006).

Recentemente, Cavalcante et al (2004) concluíram análise de dados de 527 poços, da região Bahia Sul e áreas de bacias sedimentares vizinhas. Contudo, a ausência de informações sobre as identificações dos poços e dos respectivos locais não permitiram o aproveitamento desses resultados também no mapeamento geotermal do estado da Bahia.

Diante dos problemas desta natureza, foi utilizado no presente trabalho apenas dados de temperaturas de fundo (BHT) de 27 poços localizados na região Bahia Sul (Rossi Filho, 1982; Zembruski, comunicação pessoal). Na elaboração dos mapas regionais foram utilizados resultados de perfilações térmicas de 26 poços no estado

da Bahia (Alexandrino e Hamza, 2008). Também foram levados em consideração dados geotérmicos complementares dos estados vizinhos de Espírito Santo e de Minas Gerais, constantes no Banco de Dados Geotérmicos do Observatório Nacional – ON/MCT. A distribuição espacial dos dados no estado da Bahia está ilustrada na figura (1).

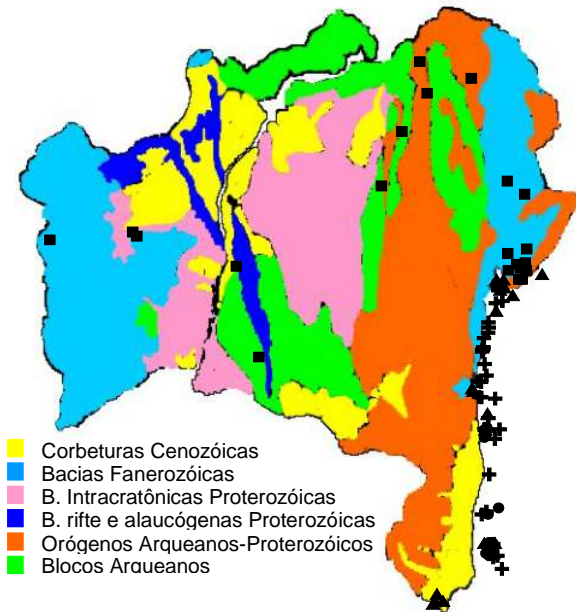


Figura 1: Mapa geológico simplificado do estado da Bahia, indicando a localização dos dados geotérmicos na área continental e na plataforma adjacente. Os símbolos indicam dados do presente trabalho (▲), aqueles relatados por Silva (2006) (+) e os da área continental (■).

Metodologia Utilizada e Resultados Obtidos

Os gradientes térmicos foram calculados para cada local utilizando-se temperaturas de fundo de poços (BHT), a partir de dados concedidos pela Petrobras. Esses dados de temperaturas necessitam ser corrigidos dos efeitos perturbadores de perfuração. A discrepância existente entre a temperatura real e a temperatura medida depende de uma série de fatores como tempo de circulação da lama e o diâmetro do poço. Na ausência de informações, necessárias para correções, desta natureza o procedimento adotado no presente trabalho se limitou a utilização do método empírico conhecido como correção AAPG (AAPG, 1976):

$$\Delta T = a Z_{BHT} + b Z_{BHT}^2 - c Z_{BHT}^3 - d Z_{BHT}^4$$

no qual ΔT é magnitude da correção, Z_{BHT} a profundidade do poço e as constantes possuem valores: $a=1,878 \cdot 10^{-3}$, $b=8,476 \cdot 10^{-7}$, $c=5,091 \cdot 10^{-11}$ e $d=1,681 \cdot 10^{-14}$.

As temperaturas do fundo do mar foram calculadas utilizando o procedimento proposto por Cardoso (2006). Essas correções que foram introduzidas mudaram significativamente os valores de temperaturas e do gradiente térmico da região que haviam sido relatados no

estudo realizado por Silva (2006), conforme ilustrado na Figura (2).

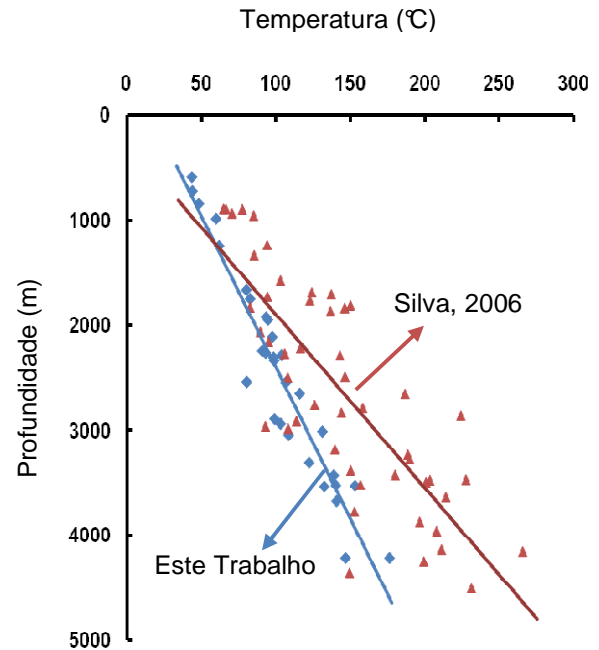


Figura 2: Análise comparativa das distribuições verticais de temperaturas de poços na região Bahia Sul. Pontos em cor vermelha indicam resultados obtidos por Silva presente trabalho.

A região Bahia Sul é composta de quatro bacias sedimentares: Camamu, Almada, Jequitinhonha e Cumuruxatiba. Encontram-se reunidos na Tabela (1) os gradientes médios de temperaturas calculadas para cada bacia utilizando-se 27 poços na área de estudo, com suas profundidades e temperaturas ilustradas na figura (2). Os valores elevados de gradientes térmicos ($>30^\circ\text{C}/\text{km}$) foram encontrados nas bacias de Jequitinhonha e Cumuruxatiba, situadas no setor sul da área de estudo. As bacias Camamu-Almada, situadas no setor norte, são caracterizadas por gradientes menores que $22^\circ\text{C}/\text{km}$. De acordo com dados desta Tabela o gradiente térmico médio calculado para a região Bahia Sul é $29,7 \pm 2,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$. Este resultado não é significativamente diferente do valor de $27,9 \pm 2,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ calculado por Cavalcante *et al* (2004), para a mesma região. No entanto, este é cerca de 50% inferior ao valor médio de $52,9 \pm 1,7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ calculado com base em dados apresentados por Silva (2006).

Tabela 1: Gradientes geotérmicos dos poços da região sedimentar Bahia Sul. N – Número de poços; G – Gradiente térmico médio.

Área	N	G (°C/km)
Bacia de Camamu - Almada	8	21,9
Bacia de Jequitinhonha	7	35,9
Bacia de Cumuruxatiba	12	30,1
Conjunto Bahia Sul	27	29,7

Mapas Geotermiais

Os mapas foram elaborados a fim de obter melhor visualização da distribuição espacial dos gradientes geotérmicos na área de estudo. A área selecionada para mapeamento se limita a uma faixa estreita na direção norte-sul, entre os paralelos de 13° e 18° Sul. O mapa desta faixa, apresentado na figura (3), indica que os gradientes térmicos se encontram no intervalo de 24 a 36°C/km, com valores relativamente maiores no setor sul em comparação com aqueles do setor norte.

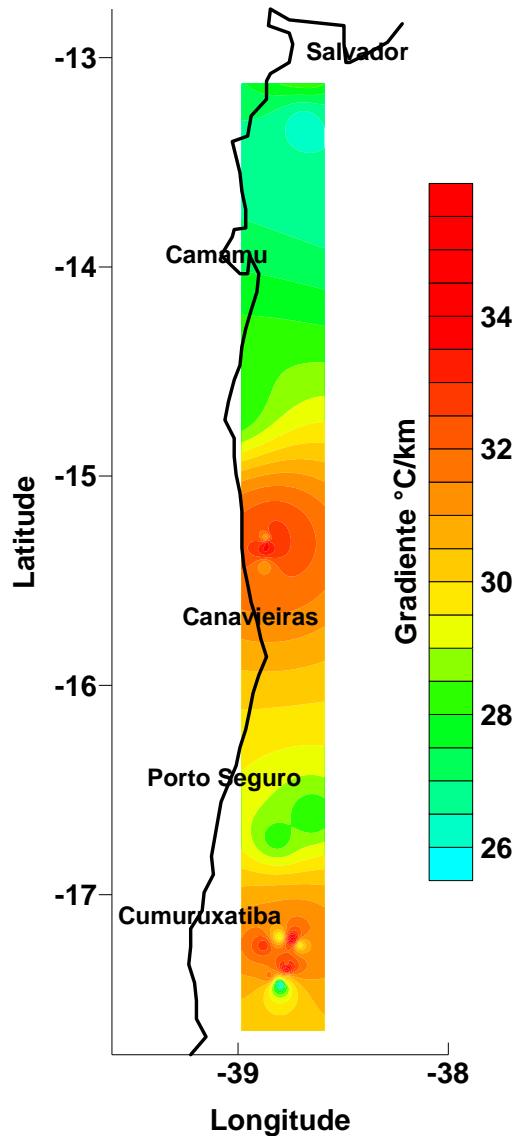


Figura 3: Mapa de gradiente geotérmico da região Bahia sul, com base em dados corrigidos.

Para fins de comparação apresenta-se na Figura (4) o mapa de gradiente térmico elaborado por Silva (2006) para a mesma área. De acordo com os resultados de Silva (2006) os gradientes térmicos na região Bahia Sul possuem valores significativamente maiores, estando no intervalo de 31 a 89°C/km. Ainda, a forma da variação regional do gradiente térmico é oposta daquela da Figura (3).

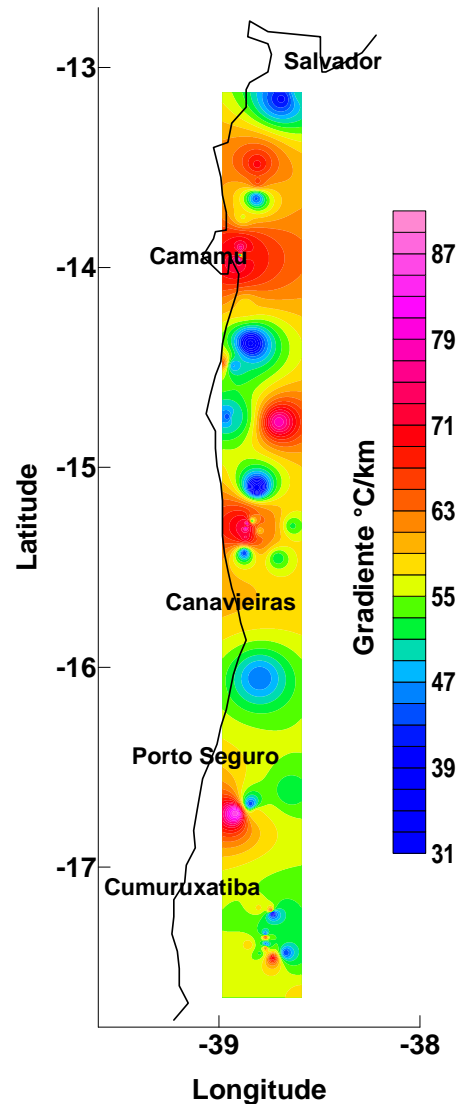


Figura 4: Gradiente geotérmico da região Bahia sul, com base em dados apresentados por Silva (2006).

Inferências sobre Geração de Petróleo e Gás

Os resultados de gradientes térmicos obtidos no presente trabalho permitem a avaliação do campo de temperaturas das camadas sedimentares. Utilizou-se para esta finalidade modelos térmicos elaborados por Hamza (1984) e informações do domínio público sobre as sequências de evolução temporal das bacias sedimentares na margem continental da área de estudo.

Como exemplo ilustrativo apresenta-se na Figura (6) a distribuição de temperaturas calculadas para as sequências sedimentares em profundidades de até 5 km. Também são apresentados nesta figura os limites máximos de profundidades das isotermais, associadas geralmente com a geração de petróleo e gás natural. A suposição fundamental neste procedimento é que o fator predominante no processo de maturação de hidrocarbonetos é a temperatura de soterramento e que o efeito de tempo é apenas secundário. Obviamente, essa suposição constitui uma avaliação simplificada, de

primeira ordem, das reações químicas do processo de maturação da matéria orgânica, mas que atende os objetivos primários do presente trabalho. Resultados das simulações numéricas indicam que a inclusão do efeito de tempo levaria à uma redução de cerca de 20% nas estimativas das profundidades.

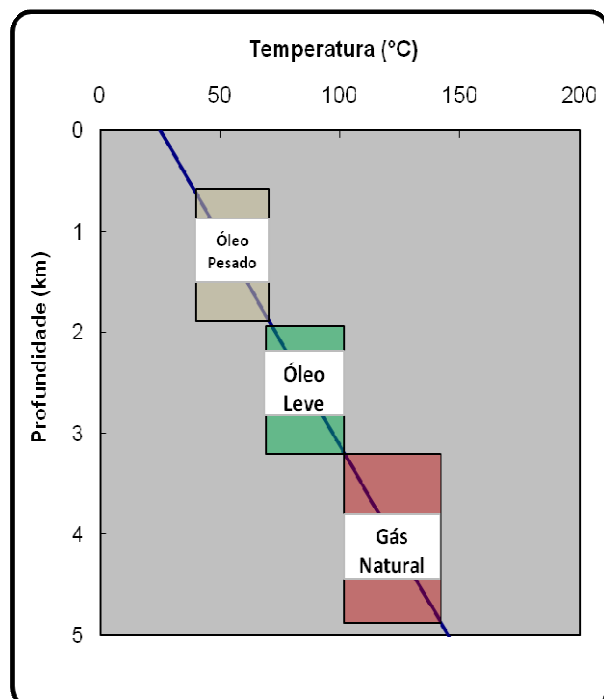


Figura 6: Estimativas de profundidades de ocorrência de hidrocarbonetos na região Bahia Sul.

Campo Térmico da Crosta

Os resultados alcançados no presente trabalho também permitem inferências sobre o campo de temperaturas da crosta na área de estudo. Neste caso, foram utilizados modelos térmicos da crosta elaborados por Hamza (1981) e Alexandrino e Hamza (2008). As distribuições de temperaturas (T) e fluxo térmico (q) na crosta foram calculadas com base nas relações:

$$T = T_0 + \frac{z(q_0 - A_0 D)}{\lambda} + \frac{A_0 D^2}{\lambda} (1 - e^{-z/D})$$

$$q(z) = A_0 e^{-z/D} D + (q_0 - A_0 D)$$

Nas equações acima z é profundidade, T_0 , q_0 , e A_0 são respectivamente os valores na superfície de temperatura, do fluxo térmico e calor radiogênico, D o decréscimo logarítmico de calor radiogênico e λ a condutividade térmica. Os valores médios de λ e D utilizada nos cálculos são 3W/mK e 10km respectivamente (Alexandrino e Hamza (2008)).

Como exemplo ilustrativo apresenta-se na Figura (7) a distribuição de temperaturas na área de bacias sedimentares da margem continental leste, em profundidades de até 40 km. Também são apresentadas nesta figura as profundidades de isoterma de Curie. De

acordo com os resultados obtidos a espessura da camada magnetizada estende-se até cerca de 25 km na região Bahia Sul. Na área continental adjacente toda crosta é magnetizada. Essas estimativas de espessuras magnetizadas da crosta são significativamente maiores que aqueles deduzidos por Silva (2006), com base na análise de anomalias magnéticas de alta resolução da área de estudo.

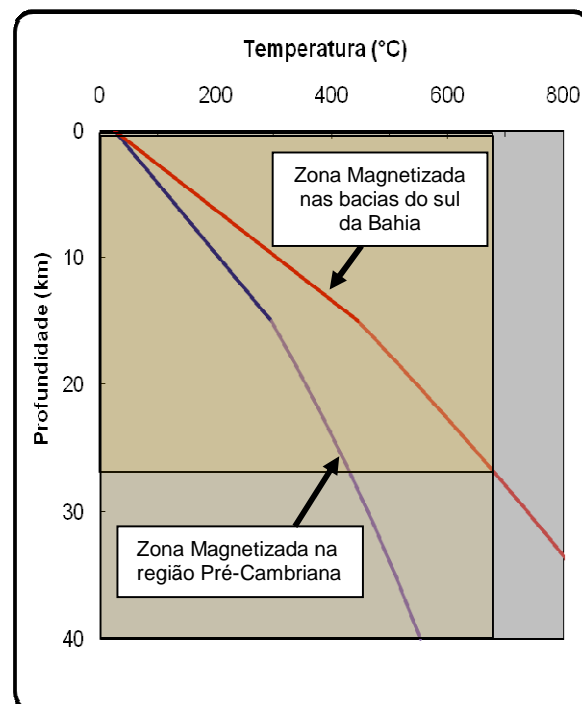


Figura 7: Estimativas da camada magnetizada na região das bacias sedimentares no sul da Bahia e na área continental adjacente.

Conclusões

Análise comparativa dos gradientes térmicos médios das áreas adjacentes permite a avaliação das características geotérmicas do segmento central da margem continental leste. De acordo com dados reunidos na Tabela (2) as bacias localizadas no segmento sul (Espírito Santo, Mucuri, Cumuruxatiba e Jequitinhonha) apresentam gradientes térmicos maiores que 28 °C/km. Por outro lado, as bacias localizadas no segmento norte (Camamu, Almada e Recôncavo-Tucano) apresentam gradientes térmicos menores que 26 °C/km.

Tabela (2) Análise comparativa dos gradientes térmicos das áreas adjacentes da região Bahia Sul.

Área	N	G (°C/km)
Bacia do Recôncavo - Tucano	13	25,2
Bacia de Camamu - Almada	8	21,9
Bacia de Jequitinhonha	7	35,9
Bacia de Cumuruxatiba	12	30,1
Bacia de Mucuri	3	28,6
Bacia do Espírito Santo	29	28,8
Bacia do São Francisco	3	21,0
Áreas Pré-Cambrianas	7	15,9

A integração de dados geotérmicos das áreas continentais adjacentes permite estender a avaliação dos contrastes no campo térmico entre a região Bahia Sul e áreas Pré-Cambrianas. O mapa apresentado na Figura (8) ilustra a natureza das variações do gradiente térmico regional do estado da Bahia. Nota-se neste mapa que as áreas cratônicas e as áreas de dobramentos Pré-Cambrianos estão caracterizadas por gradientes térmicos no intervalo de 10 a 20°C/km. Por outro lado, o segmento sul da margem continental leste é caracterizada por gradientes térmicos relativamente elevados, na faixa de 25 a 38°C/km.

Pode-se observar neste mapa uma faixa (quase norte-sul) de elevados gradientes geotérmicos, que delinea as bacias da margem continental. Parece que essa faixa segue continente adentro pela região do rifte abortado no Eoaptiano que deu origem as bacias Recôncavo-Tucano.

Conclui-se que as regiões com maiores gradientes térmicos se encontram localizadas próximas a extrusões vulcânicas do Paleógeno, interpretadas como um extravasamento de um aporte incomum de calor que ocorria desde o Barremiano (Karner, 2003 *apud* Chagas, 2003). Sendo esse um evento recente quando comparado a gênese das bacias sedimentares, que remonta ao Mesozóico. É provável que esse vulcanismo tenha dado origem aos arcos que delimitam a Bacia de Cumuruxatiba e também se deu na própria bacia, na forma de diabásios, basaltos e hialoclastitos da Formação Abrolhos; e também está presente na parte da vizinhança sul da Bacia de Jequitinhonha.

Agradecimentos

O primeiro autor deste trabalho é bolsista PIBIC/CNPq (126194/20084). Agradecemos Sylvio Zembruscki (in memoriam) pelas informações sobre gradientes térmicos da região Bahia Sul.

Referências

American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 1976, Basic data file from AAPG Geothermal Survey of North America, Univ. of Oklahoma, Norman.

Caixeta, J.M., Milhomem, P.S., Witzke, R.E., Dupuy, I.S.S. & Gontijo, G.A., 2007, Bacia de Camamu, Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), 455-461.

Cardoso, R.A., 2007, Evolução Termo-Tectônica da Plataforma Continental do Rio de Janeiro, Observatório Nacional/Coordenação de Geofísica, dissertação de mestrado, 151p.

Cavalcante, A.G., Argollo, R.M. & Carvalho, H.S., 2004, Correção de Dados de Temperaturas de Fundo de Poço (TFP), Revista Brasileira de Geofísica, 22(3), 233-243.

Chagas, L.S., 2003, Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia do Jequitinhonha, Phoenix, 59.

Gomes, A.J.L & Hamza, V.M., 2004, Mapeamento de Gradientes Geotérmicos no Estado de São Paulo, In: 1º Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo.

Gontijo, G.A., Milhomem, P.S., Caixeta, J.M., Dupuy, I.S.S. & Menezes, P.E.L., 2007, Bacia de Almada, Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), 463-473.

Mercio, S.R., 1996, Análise Estrutural da Porção Emersa da Bacia de Camamu, Universidade Federal de Ouro Preto, dissertação de mestrado, 99p.

Netto, A.S.T., Filho, J.R.W. & Feijó, F.J., 1994, Bacias de Jacuípe, Camamu e Almada, Boletim de Geociências da Petrobras, 8(1), 173-184.

Rangel, H.D., Oliveira, J.F.L. & Caixeta, J.M., 2007, Bacia de Jequitinhonha, Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), 475-483.

Rodvalho, N., Gontijo, R.C., Milhomem, P.S., Lima, C.C.U. & Manso, C.L.C., 2003, Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia de Cumuruxatiba, Phoenix, 60.

Rodvalho, N., Gontijo, R.C., Santos, C.F. & Milhomem, P.S., 2007, Bacia de Cumuruxatiba, Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), 485-491.

Serviço Geológico do Brasil, Mapa Geológico do Estado da Bahia, mapas geológicos estaduais, escala 1:1 000 000, CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: www.geobank.sa.cprm.gov.br. Acessado em Março de 2009.

Silva, G.B.D., 2006, A Superfície Curie na Região Bahia Sul – Análise Espectral sobre Dados Aeromagnéticos de Alta Resolução, Observatório Nacional/Coordenação de Geofísica, dissertação de mestrado, 139p.

Souza-Lima, W. & Hamsi JR, G.P., 2003, Bacias sedimentares Brasileiras: Bacias da margem continental, Phoenix, 50.

Souza-Lima, W., Manso, C.L.C., Andrade, E.J. & Gillo, J.L., 2003, Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia de Camamu, Phoenix, 5.

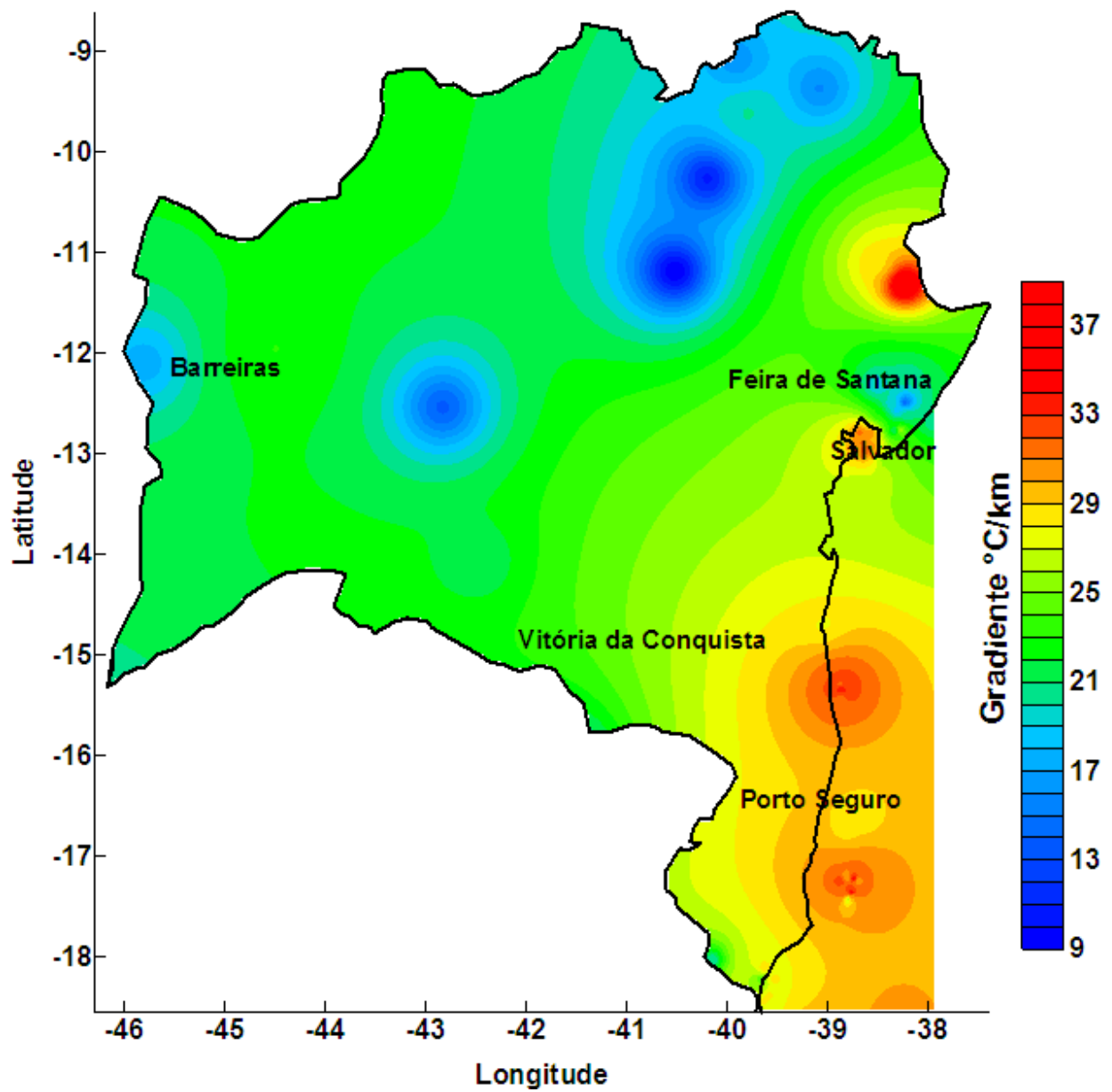


Figura 8 Mapa de gradiente geotérmico do Estado da Bahia.