

# GRADIENTE GEOTÉRMICO DAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

GEOHERMAL GRADIENT MAP OF BRAZILIAN SEDIMENTARY BASINS

Sylvio Geraldo Zemruscki<sup>1</sup> e Chang Hung Kiang<sup>1</sup>

**RESUMO** — Os estudos do gradiente geotérmico em 21 bacias sedimentares brasileiras têm sido executados paulatinamente, utilizando-se dados de temperatura de perfilações elétricas e de testes de formação em poços perfurados pela PETROBRÁS. Destas, apenas três — Médio Amazonas, Barreirinhas e Parnaíba — tiveram estudos mais completos, integrando fluxo de calor com o respectivo comportamento hidrodinâmico. O gradiente geotérmico das bacias paleozóicas brasileiras é muito variável, e seus valores, comumente, são baixos, menores que 25 °C/km, principalmente nas regiões onde o fluxo de calor é bastante influenciado pelos movimentos hidrodinâmicos. Nestas bacias as formações aflorantes e falhas são dutos preferenciais para percolação de águas meteóricas mergulho abaixo, influenciando a intensidade da temperatura de acordo com a profundidade alcançada pelos fluidos descendentes. Um exemplo desse sistema é a Bacia do Médio Amazonas. Nas bacias mesozóicas e cenozóicas, localizadas ao longo da margem continental brasileira, os gradientes geotérmicos refletem predominantemente a influência dos valores da condutividade térmica da seqüência sedimentar. Nelas, a hidrodinâmica é restrita ao movimento de fluidos devido à compactação e à ação termobárica. As bacias onde há espessas seqüências de carbonatos e/ou evaporitos (Amapá, Pará-Maranhão, Campos e Santos) são caracterizadas por baixos valores de gradiente geotérmico (menores que 23 °C/km), e, nas unidades ricas em clásticos finos, os gradientes podem ultrapassar os 35 °C/km.

(Originais recebidos em 31.05.89.)

**ABSTRACT** — Geothermal gradient studies have been conducted in 21 Brazilian sedimentary basins applying temperature data obtained from oil well logging and drill stem tests. In only three basins (the Middle Amazonas, Barreirinhas, and Parnaíba) have these investigations focused on hydrodynamic behavior and heat transport in addition to routine geothermal gradient maps. Geothermal gradients are extremely variable in Brazilian Paleozoic basins, and values are usually low (under 25 °C/km), especially in regions where heat transport is greatly influenced by hydrodynamic movements. In these basins, outcropping formations and faults serve as conduits for meteoric waters percolating downward, influencing temperature intensity as a function of the depth reached by the descending fluids. The Middle Amazonas Basin is an example of such a system. In the Mesozoic/Cenozoic basins located along the Brazilian continental margin, geothermal gradients predominantly reflect the influence of the sedimentary sequence's thermal conductivity values. In these basins, the hydrodynamic process is essentially restricted to fluid movement caused by compaction and thermobaric action. Basins with thick sequences of carbonates, evaporites, or both (e. g., Amapá, Pará-Maranhão, Campos, and Santos) are characterized by low geothermal gradient values, usually not exceeding 23 °C/km. On the other hand, basins displaying stratigraphic units rich in fine clastics present geothermal gradients with values reaching as high as 35 °C/km. These basins normally also have a less compacted sedimentary sequence that hinders heat flow transmission, thus producing higher geothermal gradients than Paleozoic basins; mean gradient values always exceed 30 °C/km.

(Expanded abstract available at the end of the paper.)

## 1 — INTRODUÇÃO

O principal objetivo dos estudos geotérmicos mundiais, *lato sensu*, está diretamente relacionado à exploração de energia geotérmica, desde a complementar,

de baixa entalpia, com ampla gama de aplicações, como na indústria e na agricultura, principalmente, até, e a mais importante, a de altas temperaturas, para produção de energia elétrica. Este calor energético provém naturalmente

<sup>1</sup> - Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisas (CENPES), Quadra 7, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21910, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

TABELA I/TABLE I

**BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS**  
*BRAZILIAN SEDIMENTARY BASINS*

Bacias Interiores		Bacias Marginais Parcial ou Totalmente Inseridas na Plataforma Continental
Bacias de Maior Interesse Exploratório e/ou de Maior Expressão Geográfica	Bacias Menores	
1. Acre 2. Alto Amazonas  3. Médio Amazonas 4. Baixo Amazonas 5. Tacutu 6. Parnaíba 7. São Francisco 8. Araripe 9. Jatobá 10. Tucano 11. Paraná 12. Pantanal Mato-Grossense	Rio do Peixe Igatu Itabaiana São Paulo Curitiba Taubaté Resende Volta Redonda e outros	13. Marajó-Badajós 14. Foz e Plataforma do Amazonas ( <i>Graben</i> de Cassiporé), plataformas do Amapá e Pará 15. São Luís 16. Salinópolis-Viseu-Bragança 17. Plataforma do Maranhão 18. Barreirinhas 19. Plataforma do Ceará 20. Potiguar 21. Pernambuco-Parnaíba 22. Sergipe-Alagoas 23. Recôncavo Baiano 24. Bahia Sul 25. Camamu-Almada 26. Espírito Santo 27. Campos 28. Santos 29. Pelotas

dos aquíferos subsuperficiais, e, artificialmente, de rochas secas quentes (*hot dry rocks*) a maiores profundidades, para onde é injetada água fria, a partir da superfície, através de fraturas produzidas por poços, e cujo aquecimento pelo calor litosférico força seu retorno, como água quente, para a superfície, através de outros poços (ARMSTEAD, 1973; OTTE, 1980; TESTER *et alii*, 1979; SANTANA, 1980; ZEMBRUSCKI, 1982a). Estas foram as primeiras e fortes razões para o grande desenvolvimento dos estudos geotérmicos.

Mais recentemente, houve grande incremento nos estudos geotérmicos voltados para a exploração de hidrocarbonetos, desde que o comportamento de seus parâmetros, em uma bacia sedimentar, constitui importante ferramenta auxiliar na determinação da janela atual de maturação de hidrocarbonetos, correlações estratigráfico-estruturais, movimentação dos fluidos existentes, cimentação de poços para petróleo, climatização de minas, etc. (PUSEY, 1973; BURST, 1969; PYRÓN & FEDER, 1981; HAN-DIQUE & BHARALI, 1981; HITCHON, 1984, entre outros).

PYRON & FEDER (1981) estudaram

três campos de óleo na costa do Golfo do México (estado da Louisiana), e, com auxílio dos valores de isothermas, a profundidades de interesses específicos, obtiveram subsídios para as interpretações da estrutura geológica da área e do comportamento dos reservatórios investigados. Concluíram experimentalmente que as diferenças de temperatura, em nível de uma formação ou reservatório, podem indicar, além de variações estratigráfico-estruturais, aspectos físico-químicos não identificáveis ou imperceptíveis pelos métodos convencionais de análise e avaliação geológica.

No Brasil, os estudos geotérmicos objetivamente direcionados para a exploração de hidrocarbonetos foram aplicados, a princípio, ao estudo das fases de geração dos hidrocarbonetos. Desde 1978, entretanto, vêm sendo efetivamente realizados estudos do comportamento geotérmico das bacias sedimentares brasileiras, principalmente pelo Centro de Pesquisas da PETROBRÁS (CENPES), com a utilização dos dados de temperatura obtidos nas perfilações elétricas e testes de formação nos poços perfurados para exploração de petróleo. Estes estudos já abrangem integrações mais específicas, como interpretações hidrodinâmicas, tectônica e outros aspectos ligados

à movimentação e armazenamento de hidrocarbonetos.

O propósito final deste trabalho é integrar estudos anteriores já mencionados e atualizá-los com novos dados de temperatura obtidos em perfurações da PETROBRÁS. O resultado é apresentado em quatro mapas na escala de 1:25 000 000.

## 2 — ESTADO DA ARTE DO CONHECIMENTO GEOTÉRMICO DAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

O Brasil possui mais de 36 bacias sedimentares, somando mais de 4 000 000 de km<sup>2</sup> distribuídos em seu território emerso e na plataforma continental.

A gênese dessas bacias é bastante variada: sinéclises paleozóicas, *rifts* inferiores, bacias costeiras de margem divergente e bacias *pull-apart* compõem, simplificada, o quadro geotectônico em que se implantam estas áreas sedimentares. Cerca de 21 dentre elas possuem maior expressão geográfica e/ou interesse exploratório para hidrocarbonetos (tabela I e fig. 1).

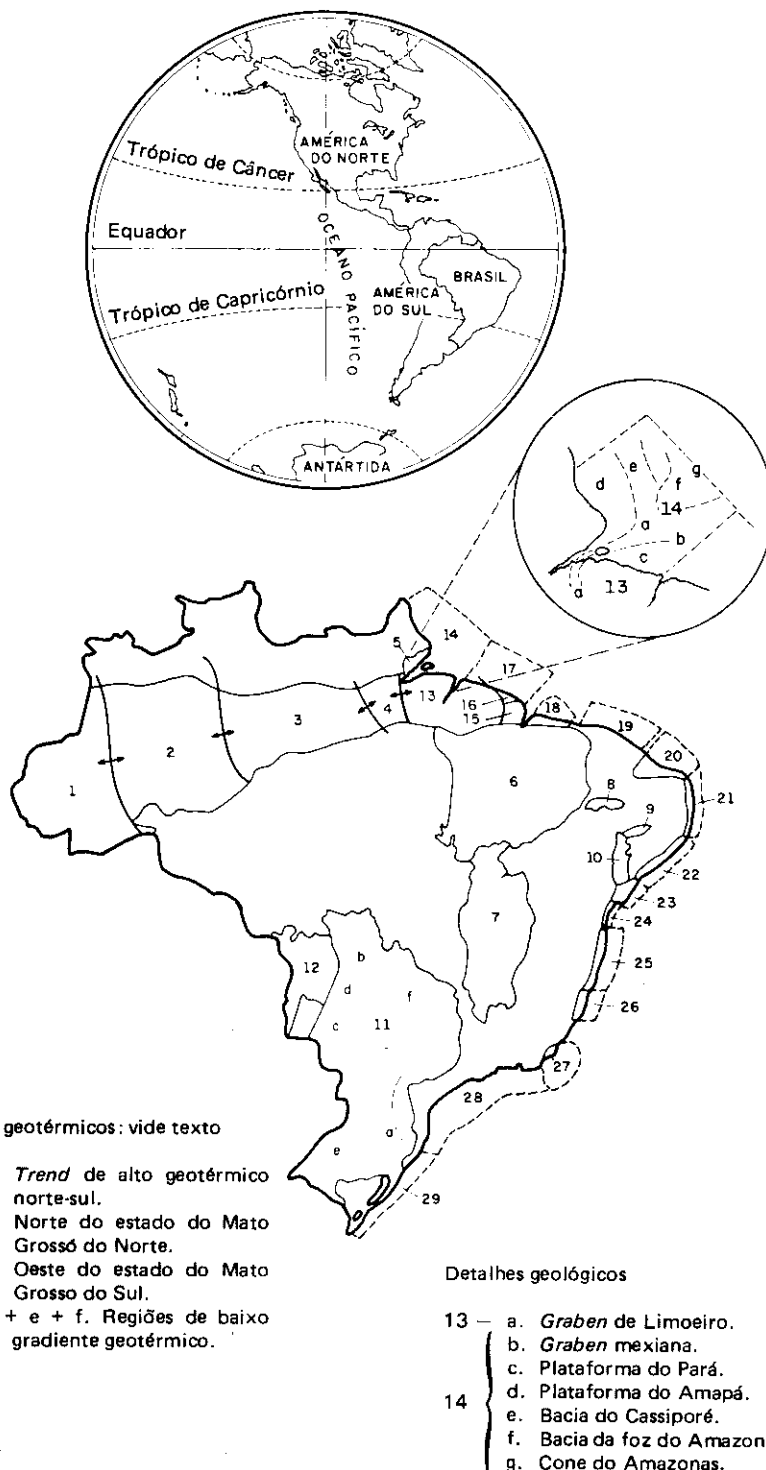


Fig. 1 - Distribuição das bacias sedimentares no território brasileiro.  
 Fig. 1 - Distribution of sedimentary basins within Brazilian territory.

Até o momento, das 29 bacias mais importantes (12 interiores e 17 marginais ou costeiras), 21 possuem algum mapeamento do gradiente térmico, pelo menos o gradiente geotérmico médio total (entre a superfície e a profundidade final de cada poço). Entre estas, a do Médio Amazonas, Recôncavo Baiano, São Luís, Barreirinhas e Parnaíba possuem, ainda, interpretação espacial, por meio da técnica de mapeamento das isothermas convertidas em gradiente geotérmico parcial, em "fatias" estratigráficas, ou seja, em níveis de profundidades a intervalos regulares. Este processo foi aplicado simultânea e independentemente por HITCHON (1984) e ZEMBRUSCKI (1984).

A Bacia do Médio Amazonas foi objeto, ainda, de um estudo mais completo, que abrange interpretações integradas do fluxo térmico e hidrodinâmico associado (CAMPOS & ZEMBRUSCKI, 1987; CARVALHO & LOBO, 1985), concluindo pelas áreas mais favoráveis à exploração de hidrocarbonetos.

Para a Bacia do Parnaíba, ZEMBRUSCKI & CAMPOS (1987) se valeram da interpretação hidrodinâmica feita por CAMPOS (1985) para concluir a respeito da movimentação atual de fluidos na bacia.

Na Bacia do Recôncavo Baiano, ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO (1984) realizaram um trabalho que correlaciona os campos de hidrocarbonetos existentes em relação às faixas de gradiente geotérmico de suas ocorrências. Daí deduziram, dentro dos níveis de profundidades mapeados, o direcionamento do desenvolvimento dos campos de óleo conhecidos e novas áreas de melhor prospectabilidade de hidrocarbonetos.

Na Bacia de São Luís, o fatiamento do gradiente geotérmico, a vários níveis de profundidade, proporcionou a indicação das áreas mais favoráveis à prospecção de hidrocarbonetos, coincidentes, inclusive, com os resultados geoquímicos, consistindo, assim, em mais uma ferramenta de apoio para dirigir os prospectos geológicos de exploração.

Para a Bacia de Sergipe-Alagoas, FONTES (1980) efetuou um estudo do gradiente e fluxo térmico, sem, no entanto, ater-se à correlação estratigráfico-estrutural.

SOUTO FILHO & PENNA FILHO (1984) e JAHNERT (1984) trabalharam o gradiente geotérmico das bacias Potiguar e Campos, respectivamente, buscando correlacionar os comportamentos geotérmicos com os aspectos estratigráfico-estruturais e com os campos de óleo presentes.

Várias experiências anteriores abordaram com alguma propriedade o assunto e muito contribuíram para este trabalho: OHOFUGI (1968), MEISTER (1973), CARVALHO (1981), ESTEVES (1978), ROSS & PANTOJA (1978), WOLFF (1979), FONTES (1980), ROSSI FILHO (1981), ZEMBRUSCKI (1982a e b, 1984, 1985), SOUTO FILHO & PENNA FILHO (1984), JAHNERT (1984), ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO (1984), CAMPOS & ZEMBRUSCKI (1987), ZEMBRUSCKI & AZEVEDO (1987), ZEMBRUSCKI & CAMPOS (1987) e CARVALHO & LOBO (1985).

Cerca de dez das bacias citadas não foram objeto de estudo geotérmico algum, por falta de perfurações que disponham de dados de temperatura, como as bacias de Tucano (alguns poços concentrados na região sul), Tacutu (apenas duas perfurações), Araripe, Jatobá, São Francisco, Pernambuco-Paraíba, Vale do Paraíba, São Paulo, Pantanal Mato-Grosso e outras menores.

Embora este trabalho tenha caráter regional geral, as considerações e conclusões se apóiam em conhecimentos e interpretações geológicas de trabalhos de maior detalhe anteriormente elaborados.

### 3 — METODOLOGIA

#### 3.1 — Dados de Temperatura

Os valores de temperatura aqui utilizados foram extraídos das perfilagens elétricas e testes de formação executados em poços perfurados pela PETROBRÁS.

No total, cerca de 2 000 poços apresentaram dados confiáveis, distribuídos em uma área total aproximada de 4 000 000 km<sup>2</sup>, com uma média de três valores por poço. Não se trata, evidentemente, de uma boa densidade espacial e nem de uma razoável distribuição de área, mesmo porque bacias mais profícuas em hidrocarbonetos, tendo, portanto, maior atividade de perfuração, apresentam maior volume de dados. Não foram plotados os pontos de controle dos dados (poços) nos mapas, para não sobrecarregar as figuras e prejudicar sua interpretação. Este controle está presente nos trabalhos individualizados para cada bacia, já citados.

#### 3.2 — Precisão e Correção dos Dados

Com relação à precisão dos dados, foram considerados três aspectos: erros de instrumentos, erros de leitura pelo operador e correções para elevar a temperatura medida o mais próximo possível da temperatura estática da formação.

Os dois primeiros, mais grosseiros, foram detectados numa primeira avaliação dos geotermogramas de cada poço e, a seguir, por análise de coerência em dois geotermogramas integrados; um reunindo todos os valores de temperatura medidos, e o outro, com gradiente geotérmico de cada temperatura obtida em relação à respectiva profundidade.

Nestes resultados, os valores exageradamente anômalos ou, anômalos em ambos os geotermogramas, foram considerados incorretos e, portanto, rejeitados. As figuras 2 e 3 exemplificam este processo, aplicado às bacias do Recôncavo (ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO, 1984) (fig. 2) e a de Barreirinhas (ZEMBRUSCKI & AZEVEDO, 1987) (fig. 3), respectivamente. Ainda assim, tais valores foram cotejados, em última instância, no contexto dos demais valores, principalmente nos mapeamentos preliminares.

O terceiro item diz respeito à correção ou à extrapolação dos valores medidos de temperatura, para aproximá-los dos valores reais da temperatura da formação, dita temperatura estática. Teórica-

mente os valores medidos durante os testes de formação, nos quais os termômetros são colocados em contato direto com as paredes de um poço, já são considerados temperaturas reais (estáticas) da formação. Consideram-se desprezíveis os fatores ou influências secundárias que agem sobre essas medidas. Já os valores de temperatura medidos junto com as perfilagens elétricas apresentam sérias restrições quanto à sua identidade com as temperaturas estáticas das formações correspondentes. A principal delas, amplamente discutida na literatura, é a influência da lama de perfuração e os diversos fatores que agem sobre a temperatura a ela transmitida pela formação adjacente.

Há vários estudos e fórmulas físicas para minimizar esta incorreção, e a PETROBRÁS, em poços perfurados a partir de 1978, adotou a correção das temperaturas pelo método ou nomograma de LACHENBRUCH-BREWER (1959). Os valores de temperatura, adquiridos antes da implantação do sistema, sem, portanto, a devida correção, foram também incluídos neste trabalho, mas sua validade só foi levada em conta após análise de coerência comparativa com outros dados vizinhos considerados consistentes no contexto dos demais valores.

#### 3.3 — Cálculo do Gradiente Geotérmico

O gradiente geotérmico médio foi calculado por meio de gráficos de dados de temperatura *versus* profundidade para cada bacia, onde os valores foram graficamente intermediados por uma reta (fig. 2). Em alguns casos, entretanto, aplicou-se a solução matemática da regressão linear dos valores medidos. Ambas as metodologias são válidas, uma vez que a diferença de precisão entre elas é pequena em relação ao valor absoluto do gradiente geotérmico médio total.

#### 3.4 — Temperatura da Superfície

A temperatura superficial foi determinada por meio de um valor médio de temperatura, obtido de qualquer uma das duas metodologias já citadas, indicado, em ambos os casos, pela interseção da

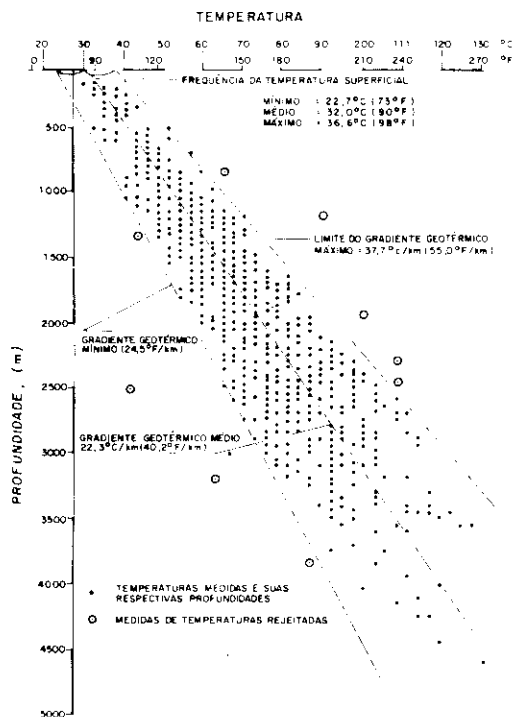


Fig. 2 - Geotermograma integrado de todos os valores de temperatura medidos na Bacia do Recôncavo Baiano, e suas respectivas profundidades (ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO, 1984).  
 Fig. 2 - Integrated geothermogram indicating all temperature values as measured in Recôncavo Basin, state of Bahia, and respective depths (ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO, 1984).

reta representativa do gradiente geotérmico médio total com a linha de superfície. Esta medida evita o efeito climático e meteórico local, muito influente até, pelo menos, 500 m de profundidade. Por outro lado, esta metodologia homogeneiza também, o valor da temperatura superficial para toda a bacia, temperatura esta por nós denominada temperatura superficial de referência (TSR). O valor da TSR foi também de grande utilidade como padrão de temperatura superficial para os poços com apenas um ou dois valores de temperatura medidos em subsuperfície, e cujo alinhamento da reta, para cálculo do gradiente geotérmico médio, seria, por vezes, muito discrepante, difícil, ou, até mesmo, impraticável, conforme o número de dados (três, dois ou um, respectivamente).

### 3.5 - Análise de Coerência dos Dados e Uso dos Geotermogramas

Um segundo geotermograma, derivado

do anterior, é o que plota os gradientes geotérmicos médios à profundidade final de cada poço (fig. 3). Ele adensa e dá maior consistência ao primeiro geotermograma.

Estes dois geotermogramas têm várias utilidades:

- verificar os valores de temperatura fora dos limites de maior densidade destes: indicar se as medições anômalas são errôneas (se assim também estiverem deslocados nos próprios gráficos de temperatura do poço respectivo e/ou também nos mapas isotérmicos preliminares) ou se constituem anomalias térmicas;
- avaliar a taxa de compactação da bacia: valores baixos de gradiente térmico, no cômputo regional e seqüencial, indicam seqüência sedimentar boa condutora de calor, e, por conseguinte, boa compactação de coluna, e vice-versa;
- profundidades e áreas de baixas e altas temperaturas podem ser detecta-

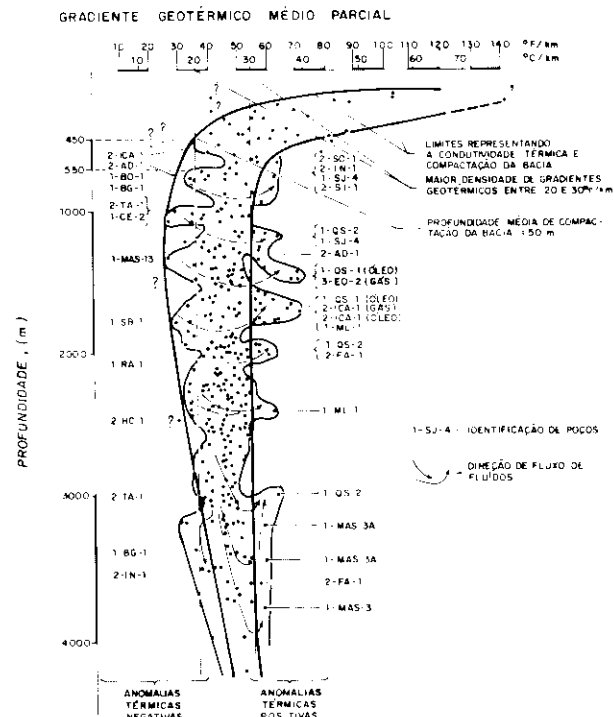


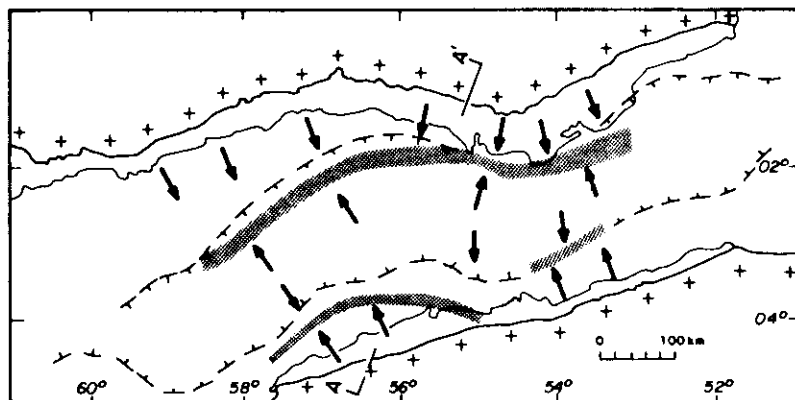
Fig. 3 - Geotermograma integrado dos gradientes geotérmicos médios parciais a cada valor de temperatura medido e sua respectiva profundidade, na Bacia de Barreirinhas (ZEMBRUSCKI & AZEVEDO, 1987).  
 Fig. 3 - Integrated geothermogram of partial average geothermal gradients at each measured temperature value and respective depths, Barreirinhas Basin (ZEMBRUSCKI & AZEVEDO, 1987).

das e, de acordo com a profundidade, refletem proximidade do embasamento, maior quantidade de calor litosférico, influxo de águas superficiais, movimentação de fluidos, etc.

## 4 - COMPORTAMENTO TÉRMICO GERAL DAS BACIAS

O estudo do comportamento térmico espacial de uma bacia fornece grande auxílio às interpretações estratigráfico-estruturais. Além disso, para cada caso, por comparação com outros parâmetros geológicos, contribui para avaliar as possíveis conotações das maiores ou menores influências da litologia e hidrodinâmica atuantes nessa bacia.

Este trabalho se apóia em um mapeamento regional do gradiente geotérmico médio total em todas as bacias sedimentares que possuíssem algum dado dispo-



**LEGENDA**

- ZONA DE CONVERGÊNCIA HIDRODINÂMICA E GEOTERMAL
- ZONA DE DIVERGÊNCIA
- FLUXO HIDRODINÂMICO
- CHARNEIRA ESTRUTURAL
- RECARGA

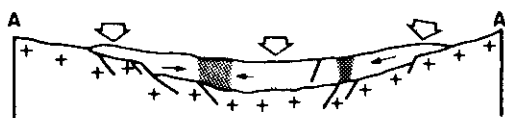


Fig. 4 - Modelo de circulação de fluidos atuante na Bacia do Médio Amazonas (CAMPOS & ZEMBRUSCKI, 1987), válido para bacias antigas, hidrodinamicamente maduras, ou seja, sistema hidrodinâmico predominante.

Fig. 4 - Active fluid circulation model for Middle Amazonas Basin (CAMPOS & ZEMBRUSCKI, 1987) valid for ancient, hydrodynamically mature basins, i. e., hydrodynamic system dominant.

nível de temperatura. É apresentado um mapa, na escala de 1:25 000 000, dividido em quatro partes para melhor se adequar à publicação (anexo I).

As bacias interiores paleozóicas, como as do Acre, Amazonas e Paraná, respondem com baixos gradientes geotérmicos, até cerca de 25 °C/km (com raros máximos de 30 °C/km), bem coerentes com suas congêneres mundiais (KLEMME, 1972a, b). Constitui exceção a Bacia do Parnaíba, onde os gradientes chegam a até 32 °C/km com maior frequência.

Nestas bacias interiores, o comportamento térmico é sempre bastante influenciado pela hidrodinâmica atuante. As formações aflorantes e falhamentos são providos de água superficial, que percola mérgulho abaixo, retornando mérgulho acima por pressão hidrodinâmica e/ou por ação convectiva do aumento de temperatura (TÓTH, 1980). Já a Bacia do Parnaíba diverge um

pouco de suas congêneres paleozóicas: possui maior proveniências de calor crustal, que aquece com mais intensidade os fluidos descensionais e provoca zonas de convexão. Foi com estes parâmetros que estudos geotérmicos, integrados aos hidrodinâmicos, nas bacias do Médio Amazonas (fig. 4) e Parnaíba (fig. 5) (CAMPOS & ZEMBRUSCKI, 1987; ZEMBRUSCKI & CAMPOS, 1987), conseguiram mostrar os padrões de movimentação atual de fluidos com bastante coerência.

As bacias marginais, quase ou totalmente inseridas na Plataforma Continental, não têm ainda um estudo geotérmico mais aprofundado. Supõe-se que seus gradientes geotérmicos devam responder às diferenças litológicas e ao grau de compactação da seqüência sedimentar. Este último deve refletir as principais fases evolutivas das bacias; ou seja, o componente sedimentar menos compacto da fase pós-*rift* confere-lhes maior re-

tenção de calor e, portanto, gradientes geotérmicos mais elevados. O contrário deve-se verificar na seqüência *rift*, cujos sedimentos mais compactados são melhores condutores de calor, refletindo, portanto, baixos valores de gradiente geotérmico. Nestas bacias, por sua condição de submersão sob a plataforma continental, o componente hidrostático atuante não permite profundas infiltrações de águas superficiais pelos afloramentos das áreas eventualmente emergidas.

Por outro lado, a predominante fase de compactação reinante na bacia confere a esta um sistema hidrostático preferencial, ou seja, fluidos gerados pela expulsão dos fluidos intersticiais, tanto pela compactação como pela ação do calor (fluidos termobáricos), movimentam-se em condições de circulação restrita e a maiores profundidades. Este aspecto foi primeiramente focado por BODNER *et alii* (1985). ZEMBRUSCKI & AZEVEDO (1987) esquematizam esta situação (fig. 6) com modificações dos primeiros autores e aplicada à Bacia de Barreirinhas. Nestas bacias, portanto, o comportamento térmico registra, preferencialmente, a condutividade térmica das litologias componentes de sua seqüência sedimentar.

É possível notar, ainda, no anexo I, um aumento do gradiente geotérmico em direção mar afora nas bacias marginais da costa leste e nordeste em relação às das extremidades norte (foz do Amazonas/Plataforma do Pará) e sul (Santos e Pelotas). No primeiro caso, o fato é explicado pela presença predominante de fácies pelíticas correspondentes às seqüências estratigráficas superiores (Cretáceo/Terciário) da fase pós-*rift* em relação às fácies mais rudáceas e compactadas da fase *rift*. Esta situação, no entanto, se reverte para as bacias situadas nas extremidades norte e sul. Nestas, a maioria dos poços exploratórios atingiu espessas seqüências carbonáticas e rudáceas e, secundariamente, evaporíticas. Estes três grupos litológicos se caracterizam por valores de condutividade térmica bem superiores àqueles dos pelitos. É verdade, também, que, por menor que seja a in-

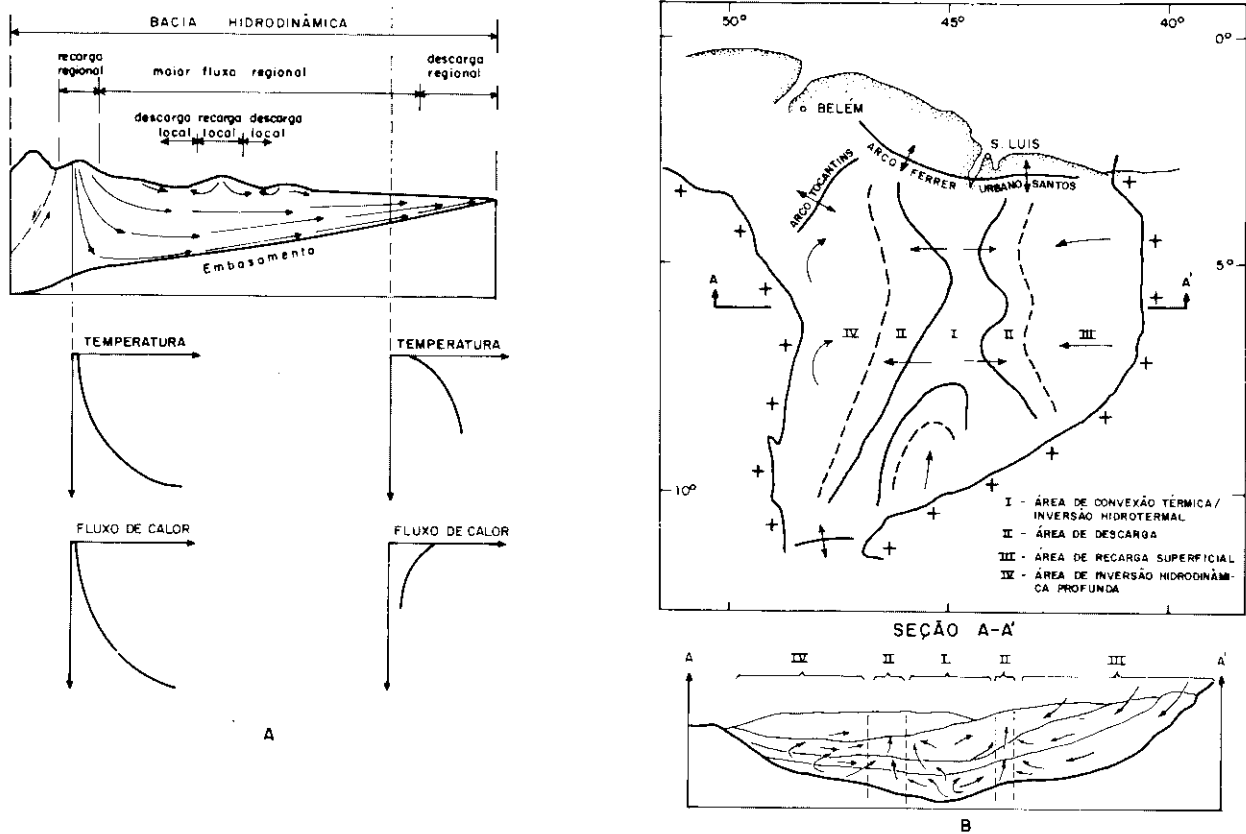


Fig. 5 - Modelo hidrodinâmico convectivo. a) Modelo de HITCHON (1984) para a Bacia de Alberta, Canadá, relacionando o movimento de fluidos com a hidrodinâmica, fluxo de calor e variações da temperatura, e estabelecendo as áreas de recarga e descarga de fluidos; b) modelo esquemático semelhante para a Bacia do Parnaíba (ZEMBRUSCKI & CAMPOS, 1987).

Fig. 5 - Convective hydrodynamic model. a) HITCHON's model (1984) for Alberta Basin, Canada, correlating fluid movement with hydrodynamics, heat flow, and temperature variations and defining fluid reload and unload areas; b) similar schematic model for Parnaíba Basin, Brazil (ZEMBRUSCKI & CAMPOS, 1987).

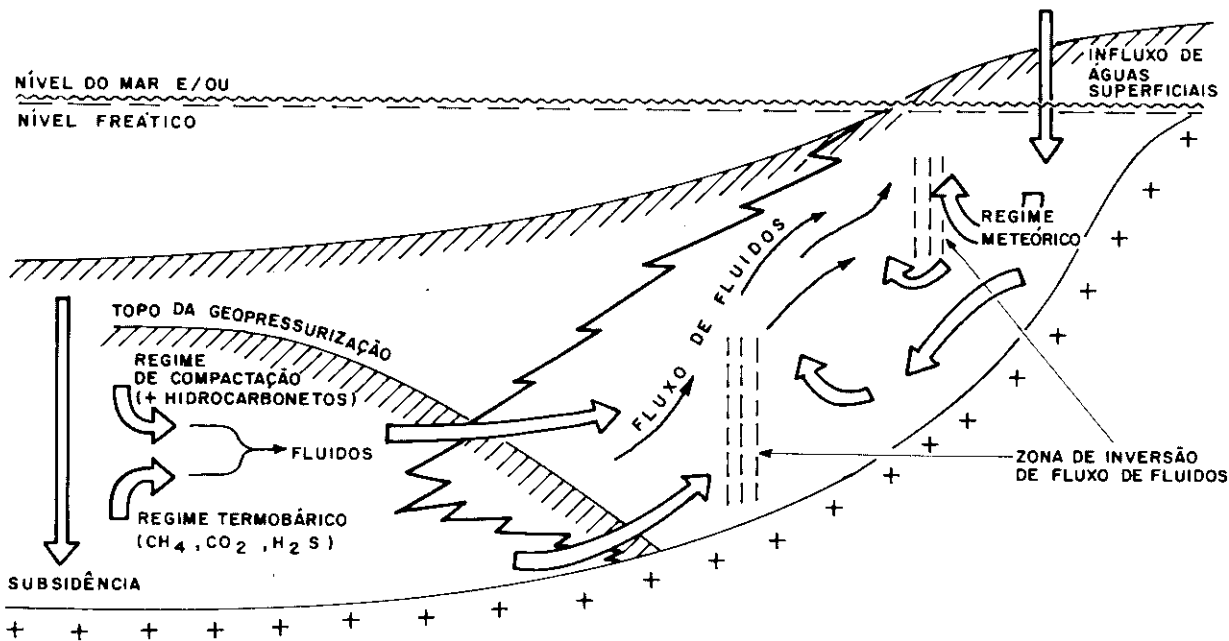


Fig. 6 - Modelo generalizado de circulação de fluidos na Bacia de Barreirinhas, do tipo misto. Principal influência da subsidência e pressão hidrostática, autogerando fluidos pelos regimes compactacional e termobarico. Influência hidrodinâmica superficial secundária. Segundo ZEMBRUSCKI & AZEVEDO (1987), adaptado de BODNER et alii (1985).

Fig. 6 - Generalized fluid circulation model for Barreirinhas Basin, mixed type. Main influence from subsidence and hydrostatic pressure, self-generation of fluids under compactional and thermobaric regimes. Superficial secondary hydrodynamic influence. According to ZEMBRUSCKI & AZEVEDO (1987), adapted from BODNER et alii (1985).

fluência de influxo de águas superficiais, sejam meteóricas ou mesmo marinhas, pelas bordas continentais ou costeiras, ela contribui com certa parcela.

## AGRADECIMENTOS

Ao Auxiliar Técnico de Geologia Nora de Castro Maia, que executou a composição integrada de todos os mapas com o auxílio da Estação Gráfica INTERGRAPH do CENPES; ao Ajudante Administrativo Irene Tomé da Silva, pela datilografia e arranjo estético.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMSTEAD, H. C. H. 1973. What is geothermal energy. In: ARMSTEAD, J. C. H., ed. *Geothermal energy, review of research and development*. Paris, UNESCO. p. 15-8. (Serie Earth Sciences, 12).
- BODNER, D. P. *et alii*. 1985. Variations in Gulf Coast heat flow created by groundwater flow. *Transaction, Gulf Coast Ass. of Geol. Soc.*, 35: 19-28.
- BURST, J. F. 1969. Diagenesis of Gulf Coast sediments and its relation to petroleum migration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 53 (1): 73-93, Jan.
- CAMPOS, J. N. dos P. 1985. *Hidrodinâmica da Bacia do Parnaíba*; "plays" alternativos na pesquisa de hidrocarbonetos. Belém, PETROBRÁS. DENOR. Relatório interno.
- CAMPOS, J. N. dos P. & ZEMBRUSCKI, S. G. 1987. *Hidrogeologia e fluxo térmico da Bacia do Médio Amazonas*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DIVEX. SEGEL. (Relatório interno, 756).
- CARVALHO, H. da S. 1981. *Método para determinação de fluxo geotérmico com aplicação nas bacias sedimentares petrolíferas do Recôncavo Baiano (Brasil) e Sumatra (Indonésia)*. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 92 p. Tese de Doutorado.
- CARVALHO, H. da S. & LOBO, P. F. S. 1985. *Estudo do fluxo de calor e movimentação de fluidos na bacia do Médio Amazonas*; Programa de pós-graduação em geofísica da UFBA, relatório p/CENPES/PETROBRÁS. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 20 p.
- ESTEVES, F. R. 1978. *Condições térmicas das bacias de Cassiporé, Foz do Amazonas e Marajó*. Belém, PETROBRÁS. DENOR. DIREX. SER-SUB. 33 p. 50 fig. (Relatório interno, 729/A).
- FONTES, L. C. A. 1980. *Determinação do fluxo geotérmico na bacia sedimentar Sergipe-Alagoas*. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 75 p. Tese de mestrado.
- HANDIQUE, G. K. & BHARALI, B. 1981. Temperature distribution and its relation to hydrocarbon accumulation in Upper Assam Valley, India. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 65 (9): 1633-41, Sept.
- HITCHON, B. 1984. Geothermal gradients, hydrodynamics and hydrocarbon occurrences, Alberta, Canada. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68 (6): 713-43, June.
- JAHNERT, R. J. 1984. *Gradiente geotérmico da Bacia de Campos*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. DESUD. DIRGEO. Relatório interno.
- KLEMME, H. D. 1972a. Heat influences size of oil giant. Part I. *Oil & Gas Journal*, 70 (29): 136-44, July.
- KLEMME, H. D. 1972b. Heat influences size of oil giant. Part II. *Oil & Gas Journal*, 70 (30): 76-8, July.
- LACHENBRUCH, A. N. & BREWER, M. C. 1959. Dissipation of the temperature effect in drilling a well in Arctic Alaska. *United States Geological Survey Bulletin*, (1083 C): 73, 109.
- MEISTER, E. M. 1973. Gradientes geotérmicos nas Bacias Sedimentares Brasileiras. *Boletim Técnico da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, 16 (4): 221-32, out./dez.
- OHOFUGI, W. 1968. *Grau geotérmico na área de Reserva Nacional (Riachuelo-Siriri-Carmópolis)*. Alagoas, PETROBRÁS. RPNE. 7 p. 5 fig.
- OTTE, C. 1980. Overview of geothermal energy development. In: AAPG/SEPM/EMD ANNUAL CONVENTION. *Book of abstracts*... Denver. p. 101.
- PUSEY, W. C. 1973. How to evaluate potential gas and oil source rocks. *World Oil*, 176 (5): 71-5.
- PYRON, A. J. & FEDER, A. M. 1981. Geo-temperature plotting; an aid to well site selection. *World Oil*, 151-62, Nov.
- ROSS, S. & PANTOJA, J. L. 1978. *Estudo geotérmico da Bacia de Campos*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. DISUD. DIRGEO. 30 p. Relatório interno.
- ROSSI FILHO, J. 1981. *Mapa do gradiente geotérmico na plataforma continental brasileira*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DIVEX. Relatório interno.
- SANTANA, C. I. 1980. *Energia geotérmica/Sistema "Hot Dry Rock"*; possibilidades de seu emprego no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM. DEGEO. (Contribuição técnica, 5081-014).
- SOUTO FILHO, J. de D. & PENNA FILHO, W. 1984. *Geotermia da Bacia Potiguar e seu relacionamento com as condições de geração e acumulação de hidrocarbonetos*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. DEBAR. DIRGEO. 33 p. Relatório interno.
- TESTER, J. F. *et alii*. 1979. *Electricity from hot dry rock geothermal energy: technical and economic issues*. Los Alamos, Los Alamos Scientific Lab. (LA-7603-MS).
- TÓTH, J. 1980. Cross-formational gravity – flow of groundwater; a mechanism of the transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration). In: ROBERTS III, W. H. & CORDELL, R. J., eds. *Problems of Petroleum Migration*. Tulsa, The American Association of Petroleum Geologists. p. 121-67.
- WOLFF, S. 1979. *Estudo geotérmico da Bacia do Espírito Santo*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. DEPEX. DISUD. DIRGEO. Relatório interno.
- ZEMBRUSCKI, S. G. 1982a. *Energia geotérmica: uso e aproveitamento econômico*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DIVEX. Relatório interno.
- ZEMBRUSCKI, S. G. 1982b. *Gradiente geotérmico das bacias sedimentares brasileiras*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. (Relatório interno, 483).



- ZEMBRUSCKI, S. G. 1984. *Estudo geotérmico da Bacia do Médio Amazonas e sua implicação nas análises estratigráficas e estruturais*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DIVEX. SEGEL. (Relatório interno, 521).
- ZEMBRUSCKI, S. G. & THOMAZ FILHO, A. 1984. *Correlação geotérmica dos campos de hidrocarbonetos do Recôncavo*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DIVEX. SEGEL. (Relatório interno, 599).
- ZEMBRUSCKI, S. G. 1985. *Estudo geotérmico da Bacia de São Luís*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DIVEX. SEGEL. (Relatório interno, 648).
- ZEMBRUSCKI, S. G. & AZEVEDO, R. P. de. 1987. *Estudo geotérmico da Bacia de Barreirinhas*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. p. 48, anexo 1. (Relatório CENPES, 759).
- ZEMBRUSCKI, S. G. & CAMPOS, J. N. dos P. 1987. *Comportamento geotérmico regional e provável movimentação de fluidos na Bacia do Parnaíba (Maranhão)*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. No prelo.

### EXPANDED ABSTRACT

The fifth largest nation in the world in geographical terms, Brazil is a country of continental proportions, covering about 8,512,000 km<sup>2</sup> of emersed area and 720,000 km<sup>2</sup> of continental shelf (ZEMBRUSCKI, 1980). About 45% of this territory is composed of sedimentary basins, 30 of which, of quite different ages and geneses, have been recognized. Electric logging temperature and drill stem test data have been obtained from a total of 2,191 wells. This well density — 5.12 x 10<sup>-4</sup> wells per km<sup>2</sup>, or one well for every 1,950 km<sup>2</sup> — is quite low, especially given that most data have been taken from only six particular wells, a situation which reflects the predominance of hydrocarbon exploration interests. Present knowledge of the geothermal behavior of Brazilian sedimentary basins is therefore still quite precarious.

Undertaken for hydrocarbon exploration purposes, geothermal studies were initially applied to the study of generation phases. Since 1978, however, studies conducted on the geothermal behavior of Brazilian sedimentary basins, mainly by the PETROBRÁS Research Center (CENPES), have sought more specific integrations with hydrodynamic and tectonic interpretations and aspects related to hydrocarbon movement and storage.

Despite low data density, it is possible to arrive at some interpretations and deductions on the regional geothermal behavior of Brazilian sedimentary basins, especially through reliance on other geological tools. Like similar basins around the world (KLEMME, 1972), inland Paleozoic basins such as the Acre, Solimões, Amazonas, and Paraná display low geothermal gradients, up to some 25 °C/km, reaching a few rare highs of 30 °C/km. These basins form a geotectonic unit lying approximately E-W and separated by structural highs known as the IQUITOS, Purus, Monte

Alegre, and Gurupá. It can be noted that the Acre and Solimões Basins display greater geothermal similarity with each other than with the other two, indicative of a tighter genetic tectonic relation between them. The thermal pattern of the Amazonas Basin is quite distinct from both that of the Solimões and that of the Baixo Amazonas. The Paraná Basin is the coldest, with most of its geothermal gradients below 25 °C/km (35 °F/km); the maximum gradient reaches but does not surpass 30 °C/km (54 °F/km). Across nearly 40% of this basin, gradient values stand equal to or below 20 °C/km (36 °F/km), probably closely linked to the great thickness of basalts and diabases, rocks which are excellent heat conductors.

Although the Parnaíba Basin is of intracratonic and Paleozoic origin, it is otherwise an exception. Compared with like basins around the world (KLEMME, 1972), its geothermal gradient values are relatively high. Given this origin, one would rarely expect to find values equal to or greater than 30 °C/km (54 °F/km). ZEMBRUSCKI & CAMPOS (1987) attribute these higher values to the type of convective movement of heat transport and of existing fluids prompted by the greater influence of crustal heat on the acting hydrodynamic process.

The marginal basins stretching along more than 3,000 km of Brazilian continental coast were formed during the South American Juro-Cretaceous rift phase. Here geothermal gradients frequently exceed 30 °C/km (54 °F/km), and the thermal behavior of these basins can also be seen as quite distinct. Along the southeastern continental margin (the Pelotas Basin and the basins extending from Santos through Campos) and in the far north (the Maranhão, Pará, Foz do Amazonas, and Pará continental shelves) geothermal gradients decrease as one moves out towards the sea, while the basins along the

eastern and northeastern margins display the opposite behavior, high geothermal gradients being noted farther into the sea. Although no study has been undertaken, it can be suggested that this geothermal behavior is related to the established tectono-structural processes and to the lithological differences of the sedimentary sequence; the latter must in turn reflect the basins' main evolutionary phases. In other words, the less compacted sedimentary component of the post-rift phase lends the basins greater heat retention capacity (as a result of a lesser capacity to conduct heat), therefore yielding higher geothermal gradients. The opposite may be observed in the rift sequence, where more compacted sediments act as better heat conductors, thus producing lower geothermal gradient values. As these basins are submersed beneath the Continental Shelf, the acting hydrostatic component does not permit sufficient water to penetrate deeply through outcroppings of areas that may be emersed. At the same time, the Basin's predominant compaction phase lends it a preferential hydrostatic system, i. e., the circulation of fluids generated by the expulsion of interstitial fluids, either via compaction or via heat effects (thermobaric fluids), is restricted and takes place at greater depths.

As the hottest of Brazilian sedimentary basins, the Potiguar presents an average geothermal gradient of 33 °C/km (59.4 °F/km), at times reaching maximums of 60 °C/km (108 °F/km). These values are exaggeratedly high for basins located on diverging continental margins. SOUTO FILHO & PENNA (1984), however, refer to KLEMME (1972), who suggests that high geothermal gradients can be expected in the case of very pelitic sedimentary sections, owing to the low thermal conductivity characteristic of shales.

### ANEXO I/ANNEX I

GRADIENTE GEOTÉRMICO MÉDIO DE TODAS AS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS ESTUDADAS  
(ESCALA DE 1:25 000 000)  
AVERAGE GEOTHERMAL GRADIENT MAPS OF ALL BRAZILIAN SEDIMENTARY BASINS STUDIED  
(SCALE OF 1:25,000,000)

