

COMPORTAMENTO GEOTÉRMICO REGIONAL E PROVÁVEL MOVIMENTAÇÃO DE FLUIDOS NA BACIA DO PARNAÍBA, MARANHÃO

REGIONAL THERMAL BEHAVIOUR AND PROBABLE FLUID MOTION MECHANISM IN THE PARNAÍBA BASIN, BRAZIL

Sylvio Geraldo Zembruscki⁽¹⁾ e Jorge Nelson dos Prazeres Campos⁽²⁾

RESUMO — Estudaram-se os parâmetros geotérmicos da Bacia do Parnaíba, associando-se o resultado com a interpretação hidrodinâmica de CAMPOS (1985). Buscou-se relacionar as anomalias presentes tanto com a litologia da seqüência sedimentar, como com a proximidade do embasamento e/ou com o calor emanado da litosfera. Pela movimentação de fluidos em subsuperfície e pela localização dos efeitos direcionais, foram deduzidas as áreas de recarga de fluidos. A Bacia do Parnaíba caracteriza-se por uma condição térmica mais elevada que suas congêneres intracratônicas paleozóicas (MEISTER, 1973; ZEMBRUSCKI, 1984a), indicando a ocorrência de algum fator anômalo atuante. As causas que nos parecem as principais são: (1) a espessa seqüência de clásticos grosseiros pouco compactados na metade superior da coluna, o que, provavelmente, dificulta o trânsito vertical de calor; (2) a seqüência de folhelhos devonianos e a presença de outros folhelhos capeadores, isolantes de calor. Os padrões geotérmicos e hidrodinâmicos observados devem também ser resultantes da natureza intracratônica e da idade paleozóica da bacia, indicando um regime hidrodinâmico centrípeto, dito maturo: águas superficiais frias penetram pelas litologias amplamente aflorantes ao longo de quase toda a sua borda leste e sul; ao atingirem maiores profundidades, em direção ao depocentro da bacia (mais ou menos centrado com relação à sua forma atual), as águas são aquecidas, sofrem convecção e têm revertido seu movimento de fluxo, tendendo a ascender à superfície. As zonas intermediárias parecem as de melhores possibilidades de armazenar fluidos menos densos, como os hidrocarbonetos.

(Originais recebidos em 04.12.87.)

1 — INTRODUÇÃO

Seguindo a filosofia de integração e interpretação de diferentes dados geológicos para a indicação de geração, movimentação e armazenamento de hidrocarbonetos, procedeu-se ao estudo dos parâmetros geotérmicos da Bacia do Parnaíba, associando-se os resultados com a interpretação hidrodinâmica estabelecida por CAMPOS em 1985.

A associação geotermia/hidrodinâmica tem dado bons resultados na exploração de hidrocarbonetos em várias pesquisas internacionais, como as de OV-NATANOV & TAMRAZIAN (1970), ROBERTS III (1979), HITCHON (1984), e JONES *et alii* (1986), mostrando que essas ferramentas se completam e permitem interpretações mais seguras quanto à migração dos fluidos em uma bacia. No Brasil, MEISTER (1984) e ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO

(1985) apresentaram boas evidências a favor do inter-relacionamento temperatura/fluidos, mas a primeira experiência dirigida foi a de CAMPOS & ZEMBRUSCKI (1987) para a Bacia do Médio Amazonas, com resultados bastante lógicos quando relacionados aos indícios de óleo e às ocorrências subcomerciais conhecidas de hidrocarbonetos.

Por serem precários os dados geológicos da Bacia do Parnaíba — devido à pequena quantidade e concentração aleatória de poços —, as interpretações geotérmicas e hidrodinâmicas se ressentem bastante da falta de continuidade de área. As partes mais profundas da bacia também não são bem conhecidas, pois se tem dado preferência a perfurações mais rasas em prospectos de altos estruturais, evidentemente mais favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos. Assim, os dados disponíveis não podem ser classificados sequer como razoáveis, seja quanto

1 - Setor de Geologia, Divisão de Exploração, Centro de Pesquisas.

2 - Divisão de Interpretação, Distrito de Exploração do Norte, Departamento de Exploração.

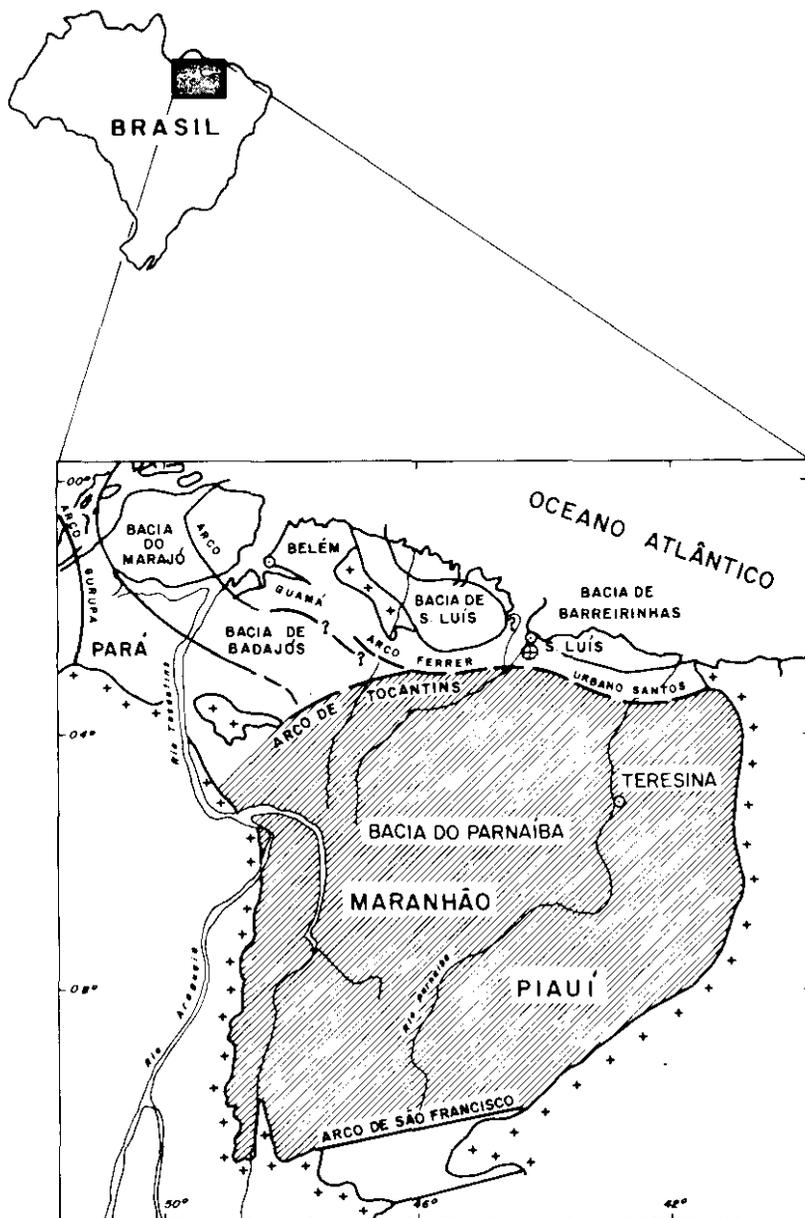


Fig. 1 - Mapa de localização da Bacia do Parnaíba (modificado de CAMPOS, 1985).

à distribuição horizontal, seja quanto à vertical. São, antes de tudo, indicadores locais, ponto de partida para interpretações preliminares.

Todo trabalho científico procura trilhar a maior racionalidade possível e busca, por intermédio da lógica aplicada aos conhecimentos específicos, chegar o mais próximo possível de seu objetivo. Foi neste sentido que se procurou trabalhar e interpretar os dados, extraindo-se deles o máximo de informações.

Com isto, nosso raciocínio interpretati-

vo, embora muito dificultado, serve apenas para futuras especulações embasadas em maior quantidade de dados, pois, se bem que as interpretações individualizadas, por poço ou agrupamento, sejam válidas, aquelas efetuadas entre poços na maioria das vezes muito distantes carecem de confiança.

2 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

A Bacia do Parnaíba, intracratônica ou interior simples (tipo IS, segundo a classificação de KINGSTON *et alii*, 1983), teve seu arcabouço formado no Eopa-

leozóico, em consequência da colisão entre as plataformas Amazônica e Brasileira (CAPUTO *et alii*, 1983). Localiza-se na região tropical N-NE do Brasil, especificamente Maranhão e Piauí, e abrange uma área aproximada de 600 000 km² (fig. 1). Apresenta-se sob a forma aproximadamente circular, e seu depocentro, levemente elíptico NW-SE, situado no centro geométrico da bacia, possui espessura de sedimentos pouco maior que 3 000 m, segundo dados sísmicos. As perfurações, porém, atingiram apenas 2 860 m.

A Bacia do Parnaíba é uma unidade geotectônica formada a partir de prováveis rifteamentos ocorridos no Proterozóico Superior (Eocambriano) em cujas depressões se instalou, evoluindo para uma fase flexural ou de sínclise no Siluriano. Deste período ao Neocarbonífero, ocorreram ciclos sedimentares clástico-marinhos alternados por discordâncias regionais relacionadas a orogenias na borda do continente Gondwana (Herciniano), refletidas no interior por movimentos epirogenéticos. No Permiano, soerguimentos nas bordas leste, sudeste e noroeste condicionaram a sedimentação continental-evaporítica e a migração do depocentro, mantendo ainda uma conexão com a Bacia de Ghana na África, mas desligando-se da Bacia do Amazonas. O período Juro-Triássico se caracterizou por magmatismo básico, com derrames de basalto na borda oeste e diques e soleiras de diabásio na mesma direção dos lineamentos transbrasilianos. A sedimentação herdada deste episódio distensivo é correlacionável com a seqüência pré-rift de algumas bacias cretáceas do Nordeste brasileiro, tais como Recôncavo e Sergipe-Alagoas. O magmatismo básico está geneticamente ligado à abertura do Atlântico Norte, dentro de um processo extensional que originou o rift de Marajó a noroeste.

Estruturalmente, a bacia tem alinhamentos com direções NE-SW, NW-SE e N-S (CAROZZI *et alii*, 1975) relacionados ao embasamento e reativados quando da abertura do Atlântico Norte. Hoje, estudos de modelos tectônicos inferem falhas transcorrentes significativas com direções NE (lineamento transbrasiliano)

que determinam a posição do depocentro e tectonizam a coluna sedimentar durante as reativações.

A coluna sedimentar, em sua maior parte, constitui-se de rochas de idade de ordoviciano a cretáceo, com delgada cobertura do Terciário e do Quaternário. Mas, para fins de interpretação hidrodinâmica e geotérmica, subdividimo-la em cinco seqüências sedimentares (fig. 2), levando em consideração os importantes eventos erosionais e tectônicos ocorridos.

A seqüência I, basal, é pré-siluriana, a mais antiga da bacia e desenvolve sua maior espessura na borda oeste. Evidentemente, por sua posição basal, é a mais compactada das seqüências sedimentares presentes.

A seqüência II constitui-se das formações Itaim, Pimenteiras e Cabeças, de idade devoniana, onde, até o presente, encontram-se os principais indícios de óleo e gás (formações Itaim e Cabeças). Geoquimicamente, a Formação Pimenteiras é identificada como a principal geradora. A subseqüência superior, formações Longá e Poti, tem seu topo marcado por uma discordância regional mesocarbonífera.

Note-se que apenas na subseqüência basal da seqüência II ocorrem indícios de hidrocarbonetos (fig. 2). Parece que os folhelhos da Formação Longá constituem barreiras isolantes para a ascensão de fluidos. Este, porém, não é um fato consumado, principalmente pela carência de poços.

A seqüência III é representada por cinco formações, encimada por uma cobertura de lavas e encerrada por significativo período erosional. Nesta seqüência nenhum indício importante de hidrocarboneto foi encontrado. Apesar deste fato e da constatação por CAMPOS (1985) de um complexo hidrogeológico mais isolado na Formação Itaim, da seqüência basal, não se pode descartar uma conexão entre as seqüências II e III.

As seqüências IV e V, Juro-Cretáceo até Quaternário, formam um grupo de cobertura onde o regime meteórico (influ-

xo de águas superficiais) é preponderante, em virtude de sua proximidade com a superfície e da maior espessura de sedimentos permoporosos.

Pelo mapa geológico esquematizado da

bacia (fig. 3), pode-se deduzir que o influxo de águas meteóricas para maiores profundidades seria mais facilitado nas bordas leste e sudeste da bacia, onde a maior área de afloramentos das seqüências I, II e parte da III, ou seja, da se-

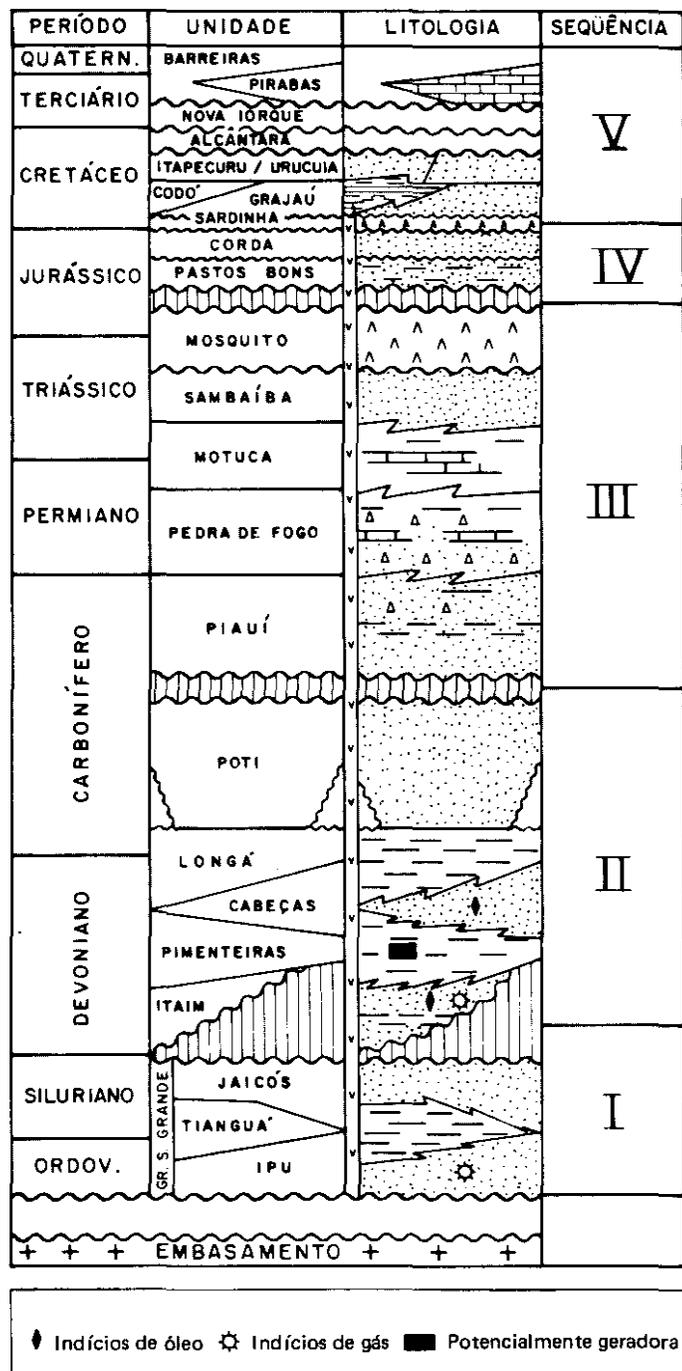


Fig. 2 - Coluna estratigráfica generalizada da Bacia do Paranaíba (CAMPOS, 1985).

qüência siluriana até a permiana, pode favorecer a ocorrência de dutos preferenciais mergulho abaixo.

3 – METODOLOGIA GEOTÉRMICA

Como em ZEMBRUSCKI (1984b), ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO (1985) e ZEMBRUSCKI (1985), também este trabalho foi iniciado com a composição individual dos perfis de temperatura, integrando os valores medidos nos perfis elétricos e nos testes de formação, para cada poço. Em cada um deles foi efetuada cuidadosa análise da

conexão dos próprios valores, além de uma comparação com os poços vizinhos. Nessa fase, houve correção ou rejeição dos erros mais evidentes.

Utilizaram-se todos os 27 poços perfurados na bacia, muitos deles concentrados em determinadas áreas consideradas de maior interesse exploratório. Para uma área de 600 000 km² este número representa uma densidade de um poço por 20 000 km². Destes 27 poços, cerca de 12 ultrapassaram a profundidade de 2 000 m e somente 10 atingiram o embasamento, principalmente nas áreas

mais rasas da bacia. Três poços mais novos possuem valores de temperatura corrigidos pelo método Lachenbruch-Brewer e cinco têm medidas de teste de formação. A grande maioria dos valores, portanto, está aquém das temperaturas estáticas das formações.

Três etapas foram seguidas no trabalho. Inicialmente, avaliou-se a temperatura superficial de referência (TSR) (ZEMBRUSCKI, 1984a) – representativa do fluxo de calor interno que chega à superfície, sem influência das condições climáticas locais – com base no valor médio encontrado tanto nos perfis de temperatura individuais cujos dados apresentavam maior coerência, como no gráfico integrado de todos os valores de temperatura (figs. 4 e 5). A TSR escolhida foi então utilizada para todos os poços no cálculo do gradiente geotérmico médio para cada poço e nos mapas finais.

Ao mesmo tempo, analisou-se a coerência dos dados, por meio dos gráficos integrados de valores de temperatura e dos de gradiente geotérmico médio parcial (CGMP) versus as respectivas profundidades (figs. 4 e 5), considerando-se anômalos, mas ainda não errôneos, os valores freqüentemente fora das figuras de maior densidade de todos os valores integrados.

A segunda etapa consistiu na elaboração dos mapas de gradiente geotérmico para diferentes níveis de profundidade, a fim de estabelecer um panorama térmico espacial tridimensional. O mapa do gradiente geotérmico médio total (CGMT) mostra o comportamento térmico médio regional da bacia, inter-relacionando os gradientes geotérmicos médios de todos os poços, obtidos pela interpolação gráfica dos respectivos valores de temperatura e profundidades de medição. Convertem-se então a profundidade correspondente a cada medida de temperatura em cota relativa ao nível do mar, preparando-se mapas do gradiente geotérmico médio parcial (GGMP) para fatias sucessivas de 500 m, desde o nível do mar até – 2 500 m.

Uma vez confeccionados os mapas de gradientes totais e parciais, os valores anômalos de temperatura foram reexa-

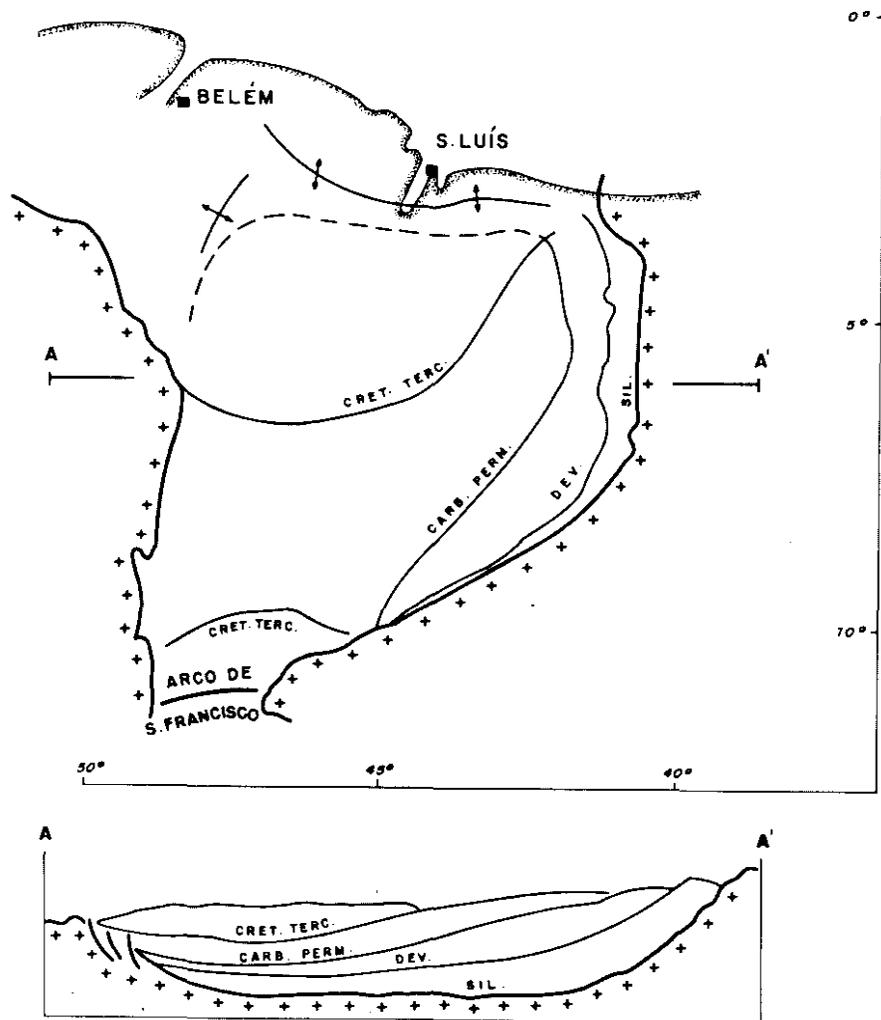
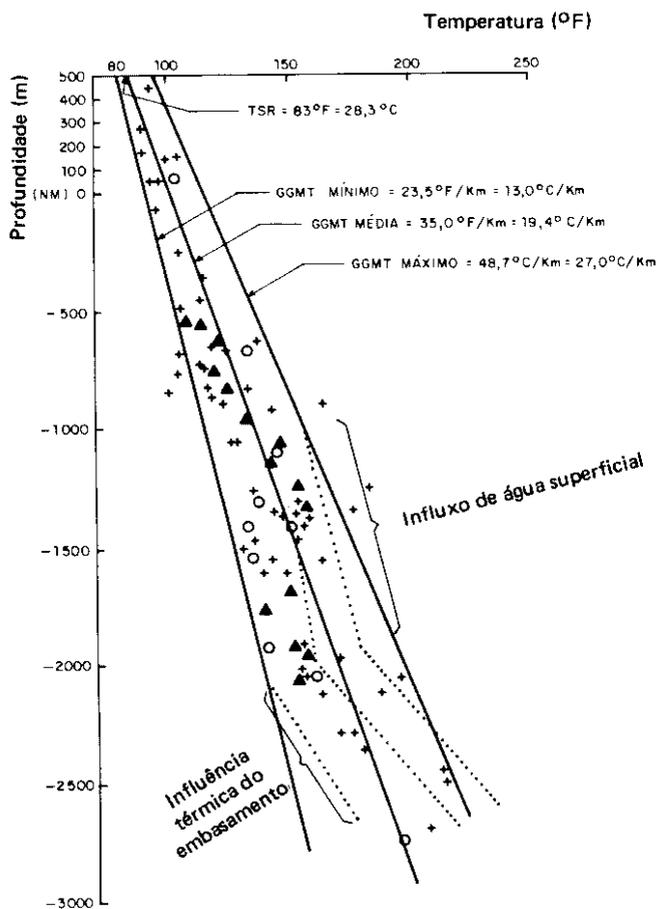
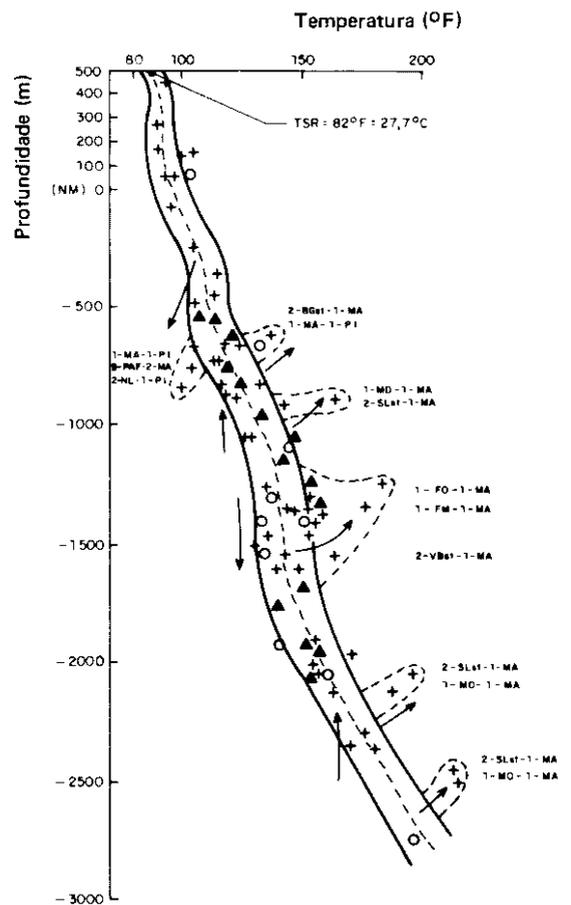


Fig. 3 - Seção geológica esquemática E-O da Bacia do Parnaíba, mostrando o comportamento da seqüência sedimentar e seu basculamento para oeste.



GGMT — Gradiente geotérmico médio total
 TSR — Temperatura superficial de referência

+ Valores de temperatura de perfilagem de poço, sem correção
 ○ Idem, com correção
 ▲ Valores de temperatura de testes de formação



○ + Anomalias geotérmicas negativas
 ○ + Anomalias geotérmicas positivas
 ↙ Influxo de fluidos frios
 ↘ Ascensão de fluidos quentes

+ Valores de temperatura de perfilagem de poço, sem correção
 ○ Idem, com correção
 ▲ Valores de temperatura de testes de formação

Fig. 4 - Gráfico integrando o total de medidas de temperatura e respectivas profundidades, mostrando os gradientes geotérmicos regionais limite e médio da Bacia do Parnaíba.

Fig. 5 - Gráfico integrando as medidas de temperatura de toda a Bacia do Parnaíba, nas respectivas profundidades, mostrando as oscilações verticais da curva média do gradiente geotérmico e as anomalias térmicas positivas e negativas.

minados em busca de figuras isotérmicas isoladas — tanto nos mapas como nos gráficos de cada poço — que, consideradas errôneas, eram rejeitadas (ZEMBRUSCKI, 1984b; ZEMBRUSCKI & THOMAZ FILHO, 1985; ZEMBRUSCKI, 1985).

Cabe frisar que esses gráficos, além de servirem como depuradores de dados, ressaltam outros aspectos importantes:

- parâmetros (limites e médio) dos gradientes geotérmicos da bacia;
- anomalias geotérmicas e respectivas

profundidades identificadas em certas áreas, por meio de análises em poços;

- comportamento térmico regional e espacial indicado pela maior ou menor dispersão dos valores de temperaturas e de gradientes geotérmicos e pelas respectivas figuras formadas e suas inflexões;
- identificação do grau de maior ou menor compactação da coluna de sedimentos e respectivas profundidades;
- influência do embasamento;

- influência de seqüências litológicas;
- presença e/ou percolação de fluidos quentes e frios.

Na terceira etapa, foram analisadas as anomalias térmicas remanescentes nos diversos gráficos e mapas depurados e plotadas as isotermas em seções geológicas, na tentativa de interpretar a movimentação de fluidos na bacia.

4 — PARÂMETROS GEOTÉRMICOS GERAIS

A temperatura superficial de referência

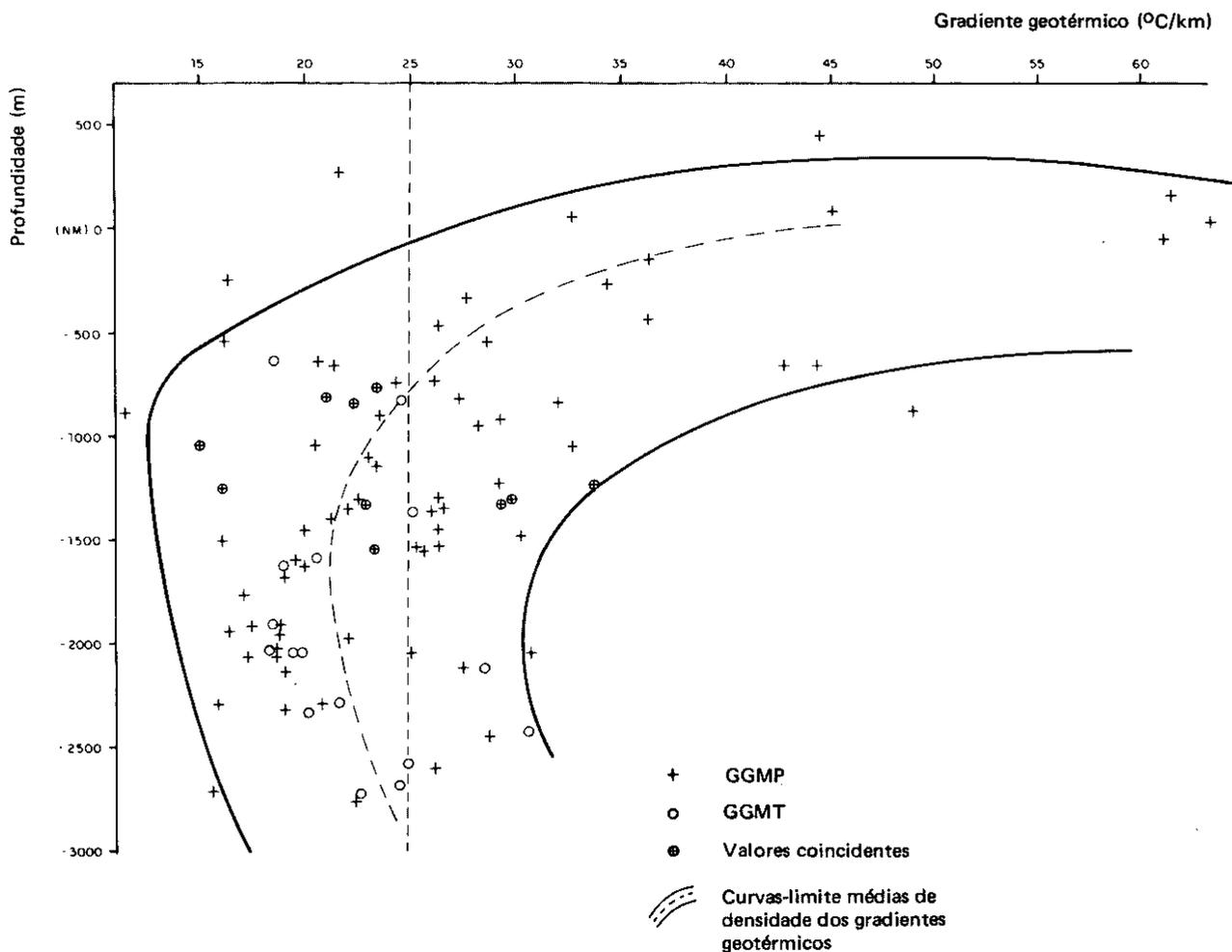


Fig. 6 - Gráfico dos gradientes geotérmicos médio parcial e total versus respectivas profundidades.

(TSR) foi fixada em 27,7 °C (82 °F), conforme as figuras 4 e 5. Em alguns locais, de acordo com os gráficos de temperaturas individuais dos poços, a TSR calculada foi um pouco mais elevada (28,3 °C e até 30,0 °C), mas a média preponderante foi de 27,7 °C. Assim, apenas os cálculos dos gradientes regionais mais superficiais devem ter sido ligeiramente afetados.

Os limites mínimo e máximo do gradiente geotérmico da bacia se encontram entre 13 °C/km (23,5 °F/km) e 27,0 °C/km (48,7 °F/km) respectivamente. A média corresponde ao gradiente de 19,4 °C/km (35,0 °F/km) (fig. 4). A determinação destes limites foi gráfica, sendo facilmente identificada pela uniformidade e pouca dispersão dos dados, excluídos alguns valores anômalos.

Mais particularmente, podem-se observar duas significativas quebras nos gra-

dientes-limite, indicadas por retas pontilhadas na figura 4: a primeira, nas retas dos gradientes máximo (à profundidade de 1 000 m) e médio (a - 1 500 m), exibe certo paralelismo na diminuição dos dois gradientes; a segunda, nas retas dos gradientes mínimo, médio e máximo, à profundidade de 2 000 m, inverte a tendência anterior, ou seja, faz com que os gradientes voltem a aumentar, até mesmo acima da tendência regional. O primeiro fato está relacionado à invasão de águas superficiais frias a maiores profundidades; o segundo, à convecção térmica forçada pela produção de calor proveniente do embasamento.

Do gráfico da figura 5 consta a envoltória dos valores de temperatura mais frequentes, englobando alguns valores aparentemente estranhos, mas que, testados nos vários estágios da análise de coerência efetuada, demonstram não serem errôneos e, portanto, constituem reais

anomalias térmicas positivas e negativas. As positivas, em maior número, aparecem em cinco diferentes profundidades. Observa-se, também, uma alternância rítmica dos gradientes geotérmicos médios, identificada nas inclinações alternadas da respectiva curva.

O gráfico da figura 6 reúne os valores do gradiente geotérmico médio parcial (GGMP) para cada valor de temperatura medido, ou seja, o gradiente geotérmico relativo a cada temperatura em função da respectiva profundidade (ao nível do mar) e da temperatura superficial de referência (TSR). Integra, também, os gradientes geotérmicos médios totais dos diferentes poços. Observa-se grande dispersão de valores em todas as profundidades, resultando em que as curvas envoltórias de maior densidade de pontos se apresentam muito afastadas. Até por volta dos - 1 300 m (equivalentes a uma espessura sedimentar de 1 900 m)

podem-se observar valores de gradientes muito altos (maiores que 50 °C/km) e muito baixos (menores que 15 °C/km), refletindo o fato de que esta seção, de fator muito baixo de compactação e constituída de sedimentos de baixa condutividade térmica (altos gradientes geotérmicos), é, por outro lado, bastante influenciada por águas meteóricas mais frias (zona com baixos gradientes geotérmicos). Daí até cerca de - 3 000 m, os gradientes se distribuem numa faixa mais homogênea (entre 16 °C/km e 32 °C/km), mesmo assim ainda bastante ampla, mas que sugere maior porosidade nos sedimentos desta zona, que dificulta o trânsito do fluxo térmico, ou maior aporte de calor litosférico, excedendo a capacidade condutora térmica da zona sedimentar subjacente.

5 - COMPORTAMENTO TÉRMICO DA BACIA

Os mapas das figuras de 7 a 10 apresentam um esboço da distribuição em área dos gradientes geotérmicos: o primeiro mostra os gradientes geral e total da bacia, os demais mostram os gradientes em diferentes níveis de profundidade. Eles permitem tão-somente uma precária interpretação regional. Apesar disto, confirma-se para a Bacia do Parnaíba uma condição geotérmica sensivelmente superior à de suas congêneres paleozóicas intracratônicas, pelo menos no Brasil (MEISTER, 1973; ZEMBRUSCKI, 1984a). Citamos as seguintes evidências:

- A temperatura superficial de referência, em média de 27,7 °C (82 °F), localmente de 28 °C e até 30 °C, é superior às encontradas nas bacias do Acre e Médio Amazonas, cuja TSR máxima é de 26,6 °C (80 °F), ou na Bacia do Paraná, onde chega a 24 °C (75 °F) (ZEMBRUSCKI, 1984a e b). Ainda em relação à TSR, o valor mínimo encontrado, de 27,7 °C, deve estar relacionado às regiões de maior influxo de águas frias superficiais, abundantes na bacia. O valor médio real, portanto, deve ficar mais próximo de 30 °C;
- Os gradientes geotérmicos apresentados na figura 6 mostram que, em pra-

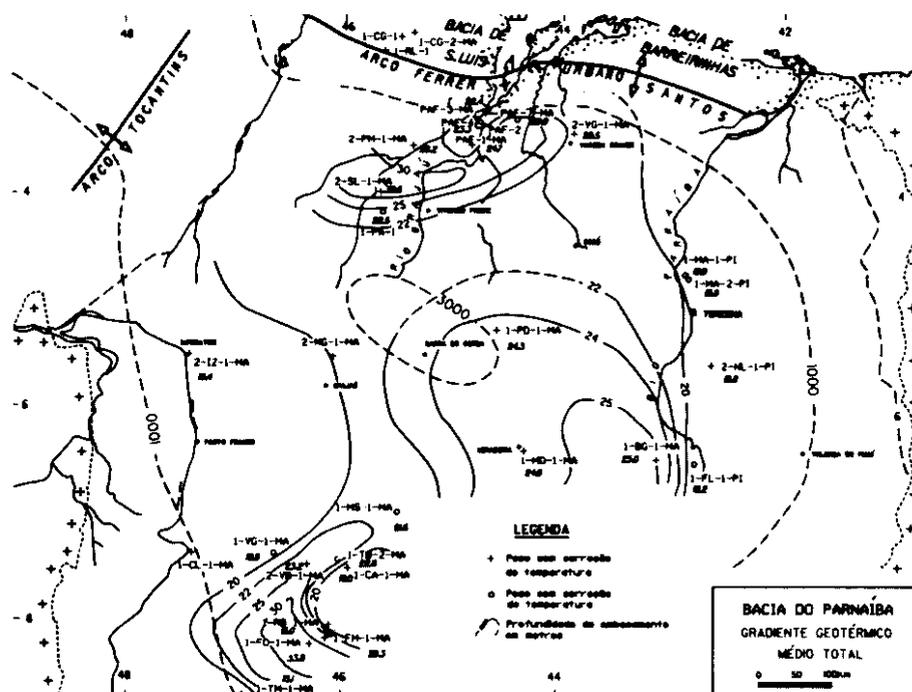


Fig. 7 - Bacia do Parnaíba – gradiente geotérmico médio total.

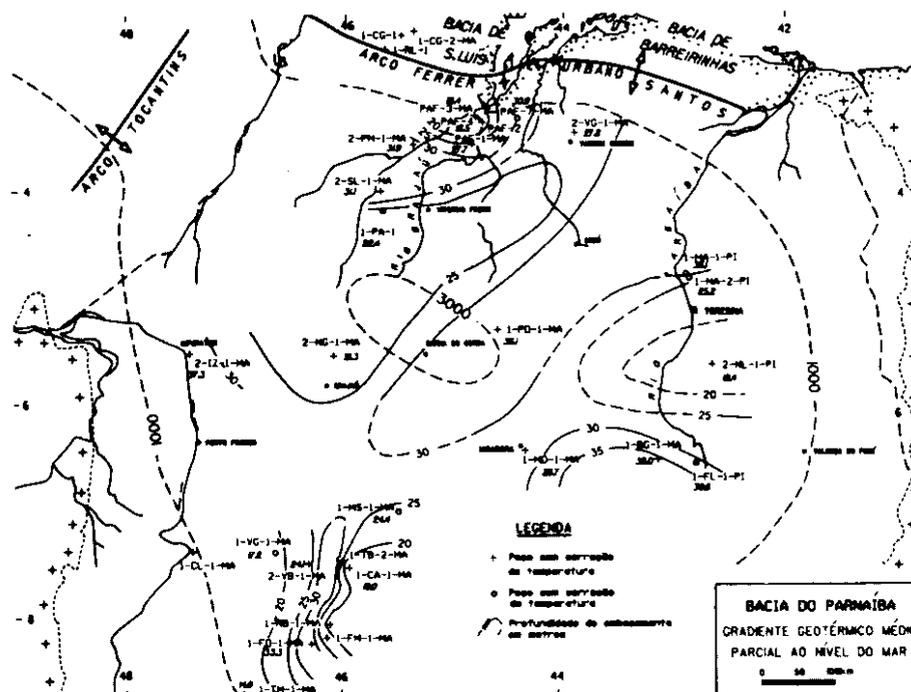


Fig. 8 - Bacia do Parnaíba – gradiente geotérmico médio parcial ao nível do mar.

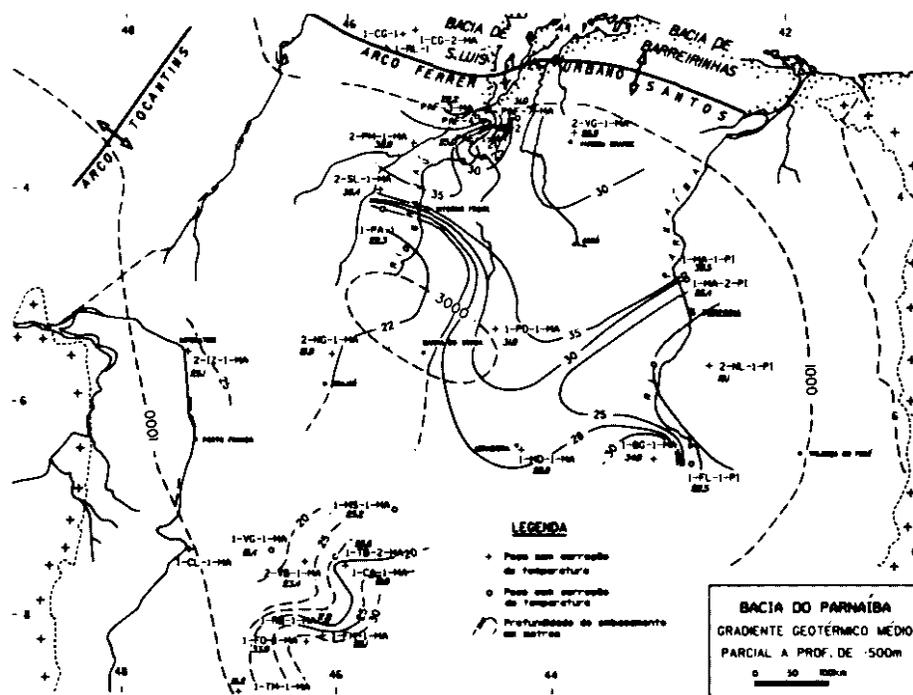


Fig. 9 - Bacia do Parnaíba — gradiente geotérmico médio parcial à profundidade de - 500 m.

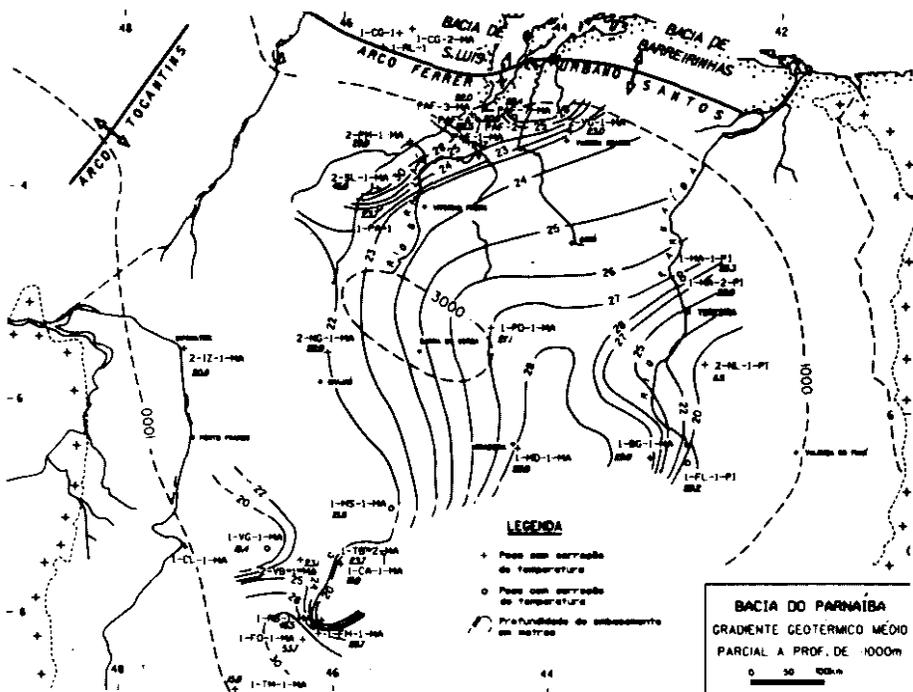


Fig. 10 - Bacia do Parnaíba — gradiente geotérmico médio parcial à profundidade de - 1 000 m.

ticamente a metade (48%) dos casos, os valores encontrados para a Bacia do Parnaíba excedem os 25 °C/km. Tal não acontece nas outras bacias similares, onde raros são os valores altos. Além disso, na Bacia do Parnaíba, os valores altos ocorrem em todas as faixas de profundidade e em quatro núcleos distintos. Em três desses núcleos — nas bordas norte, sudoeste e centro-leste (figs. 7 a 10) —, os valores altos são freqüentes até a profundidade de 2 000 m aproximadamente; no quarto — borda nordeste —, manifestam-se até os - 500 m, mas se prolongam para o depocentro da bacia a maiores profundidades;

c) Na integração dos gradientes geotérmicos médios totais e parciais (fig. 6), detecta-se o alto comportamento geotérmico regional de quase toda a coluna, interrompido apenas na parte média da seção, provavelmente devido à maior concentração, nesta, de águas frias superficiais descensionais. Como um todo, acreditamos que a influência da litologia e da ação convectiva do calor do embasamento seja maior que a ação das águas frias superficiais descensionais.

Embora parte do incremento de gradiente observado provavelmente se deva ao fato de os poços alcançarem pouca profundidade (em direção à superfície, as bacias sempre tendem a apresentar maiores temperaturas), verifica-se que, nos poucos poços mais profundos, as temperaturas também se apresentam mais elevadas. Por isso, o fator profundidade de poços pode também influir, mas não é decisivo.

Assim, o maior responsável pelo atípico alto comportamento térmico da Bacia do Parnaíba seria a composição litológica de sua seqüência sedimentar, pois a predominância de clásticos mais grosseiros pouco compactados e de litologias argilosas isolantes (folhelhos devonianos principalmente) (fig. 2) dificulta o fluxo de calor.

6 - PROVÁVEL MOVIMENTAÇÃO ATUAL DE FLUIDOS

A Bacia do Parnaíba tem ampla faixa de

formações aflorantes nas bordas leste-sudeste e sul, que permite intenso influxo de águas superficiais. Tal fato, aliado à condição de bacia geologicamente antiga, lhe confere grande maturidade hidrodinâmica. Neste caso, deveria haver preponderância do regime centrípeto de fluidos, evidenciado no trabalho de CAMPOS (1985): águas superficiais se infiltrando pelas bordas da bacia até profundidades em que altas temperaturas convulsionam o sistema hidrológico, com a convecção impelindo os fluidos mergulho acima.

A posição das prováveis áreas de recarga (influxo) de águas superficiais e de descarga (afluxo) de fluidos quentes pode ser inferida a partir dos mapas do gradiente geotérmico (figs. 7 a 10), estando as primeiras refletidas nos gradientes geotérmicos iguais ou menores que 20 °C/km; as áreas de descarga, suspeitamos, estão naquelas representadas por gradientes geotérmicos superiores a 27 °C/km.

Pela borda leste, há maior aporte (recarga) de fluidos meteóricos em direção ao depocentro da bacia, onde as maiores temperaturas provocam aquecimento e convecção (ascensão, por qualquer tipo de duto — como permeabilidade vertical e horizontal, fraturas, falhas, etc.) dos fluidos para as zonas superficiais de menores pressões. Entre estas duas zonas, há, então, uma faixa vertical de convergência de fluidos que tendem a ascender à superfície.

Pela borda oeste, as interpretações geotérmicas e hidrodinâmicas, por falta de dados, são subjetivas, baseadas principalmente nos aspectos geológicos; na subárea sudoeste, a interpretação geotérmica mostra baixos valores de gradiente, o que pode indicar também uma área de influxo de águas superficiais, mas com potencial bem menor que o da borda leste. Na região noroeste, a falta de poços impede caracterização geotérmica mais precisa, mas o arcabouço sugere que os fluidos existentes nesta região sejam barrados, em sua trajetória mergulho abaixo ao longo das camadas sedimentares, pela borda do embasamento limitante da bacia. Af, a ação do calor

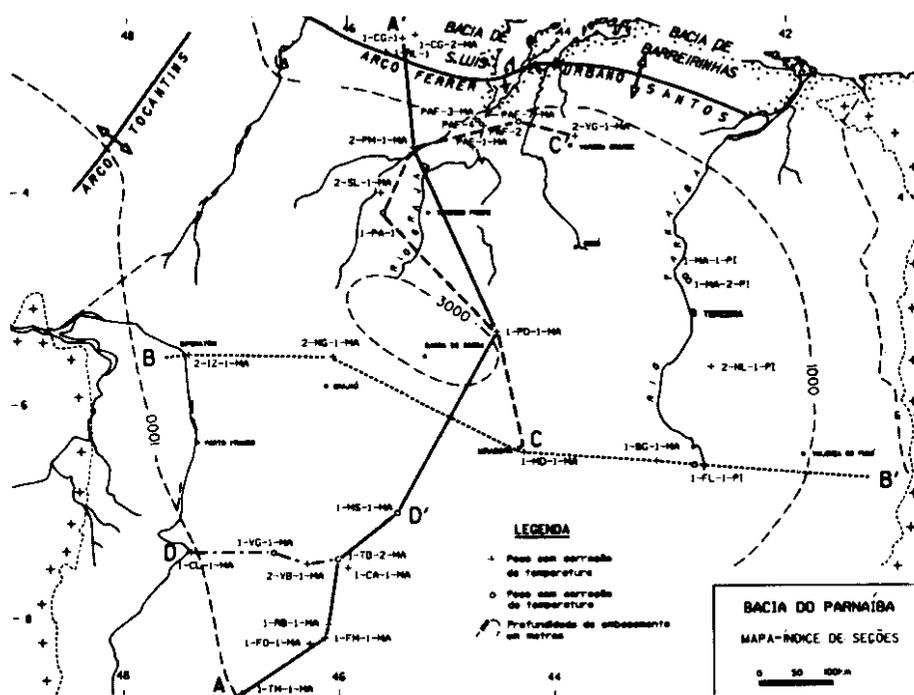


Fig. 11 - Bacia do Parnaíba — mapa-índice de seções.

litosférico faz com que os fluidos sofram reversão no trajeto e tendam a se movimentar para a superfície, no sentido horizontal, para leste. Neste caminho, os fluidos encontram o movimento reverso daqueles impelidos pela ação de convecção do calor do depocentro da bacia. Forma-se, então, outra área de convergência e ascensão dos fluidos movimentados.

O padrão hidrodinâmico, elaborado por CAMPOS (1985), assemelha-se ao padrão geotérmico mapeado. As calhas potenciométricas de Rio Mearim e Testa Branca, com direção norte-sul, atravessando toda a bacia, coincidem com a faixa de mais altos gradientes geotérmicos. O Alto Potenciométrico Pindaré-Mirim, na borda noroeste da bacia, coincide com uma das áreas de descarga sugerida pelo parâmetro geotérmico. Tais coincidências, evidentemente, têm causas comuns em se tratando de fluxos concomitantes de calor e fluidos.

Estes aspectos são mostrados com mais detalhe nas seções geológicas das figuras de 11 a 16, que combinam as interpreta-

ções hidrodinâmicas e geotérmicas.

Finalmente, o mapa da figura 17 constitui um somatório das figuras térmicas mapeadas nos diversos níveis de profundidade, evidenciando uma faixa N-S de mais altos gradientes geotérmicos (superiores a 27 °C/km), que se estende desde a borda norte, inicialmente um pouco mais ampla por sobre o Arco Ferrer-Urbano Santos, passa pelo centro da bacia, onde se bifurca, e se prolonga para as bordas sudeste e sudoeste. Enquanto na área central a maior temperatura está condicionada à baixa condutividade térmica da coluna de sedimentos, ainda que bastante minimizada pela ação hidrodinâmica na bacia, as áreas mais quentes posicionadas nas bordas devem refletir a proximidade do embasamento.

7 — CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

Os dados geotérmicos disponíveis mostram, em geral, boa concordância com os resultados hidrodinâmicos anteriormente alcançados para a Bacia do Par-

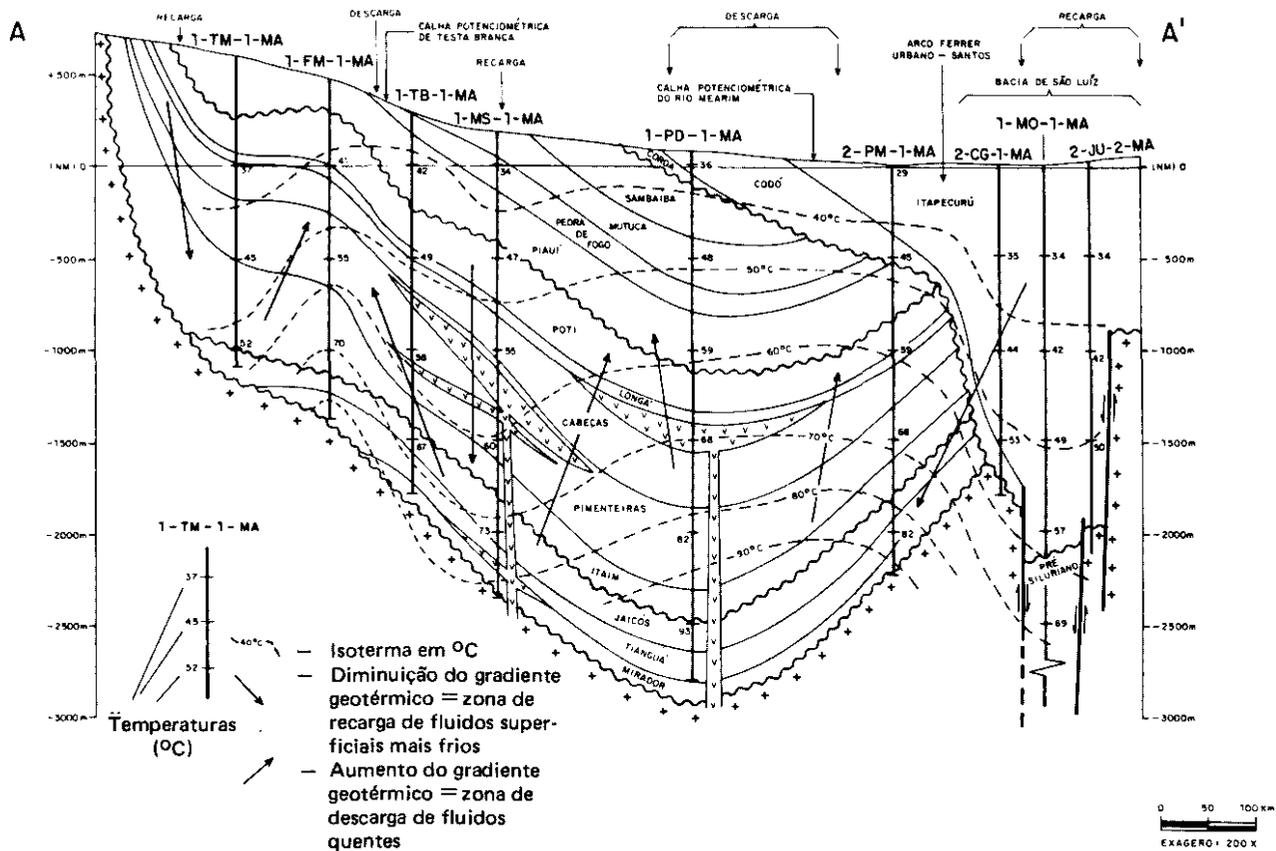


Fig. 12 - Seção geológica (modificada de DEPEX, 1980), aproximadamente sul-norte, da Bacia do Paraíba, com superposição de isotermas e indicações de zonas de recarga e descarga de fluidos.

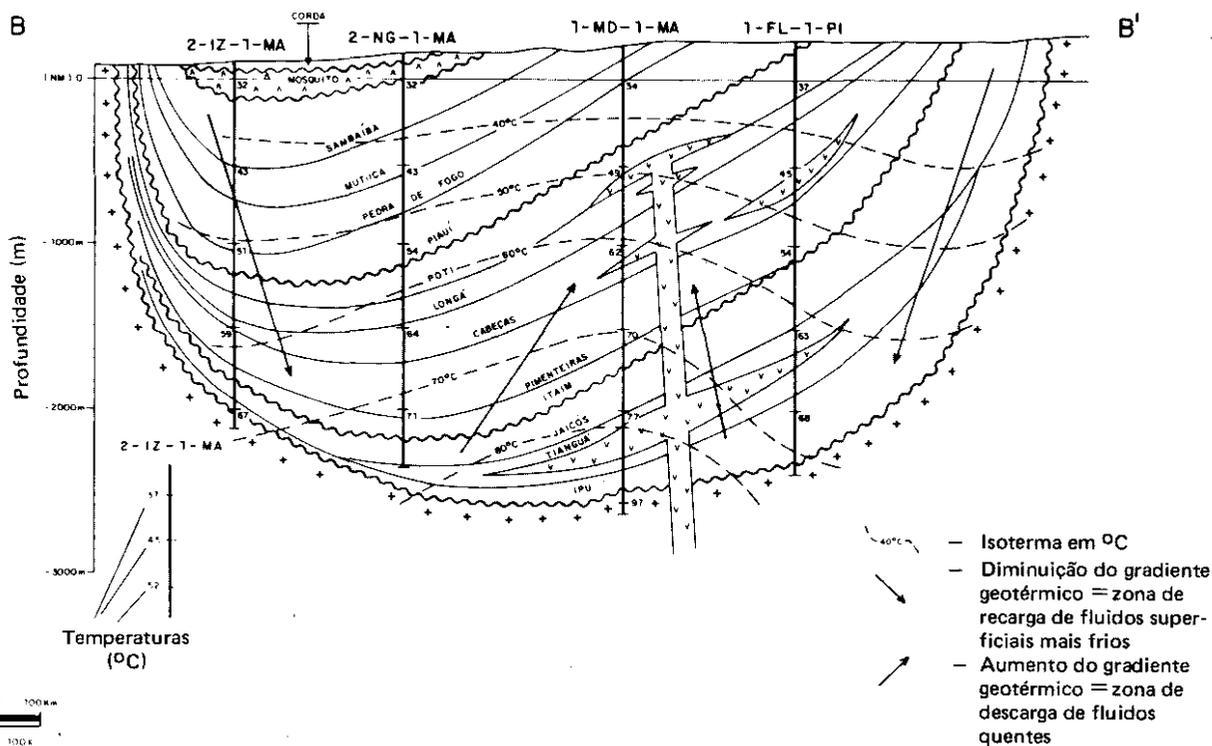


Fig. 13 - Seção geológica (DEPEX, 1980), aproximadamente oeste-leste, da Bacia do Paraíba, com superposição de isotermas e indicações de zonas de recarga e descarga de fluidos.

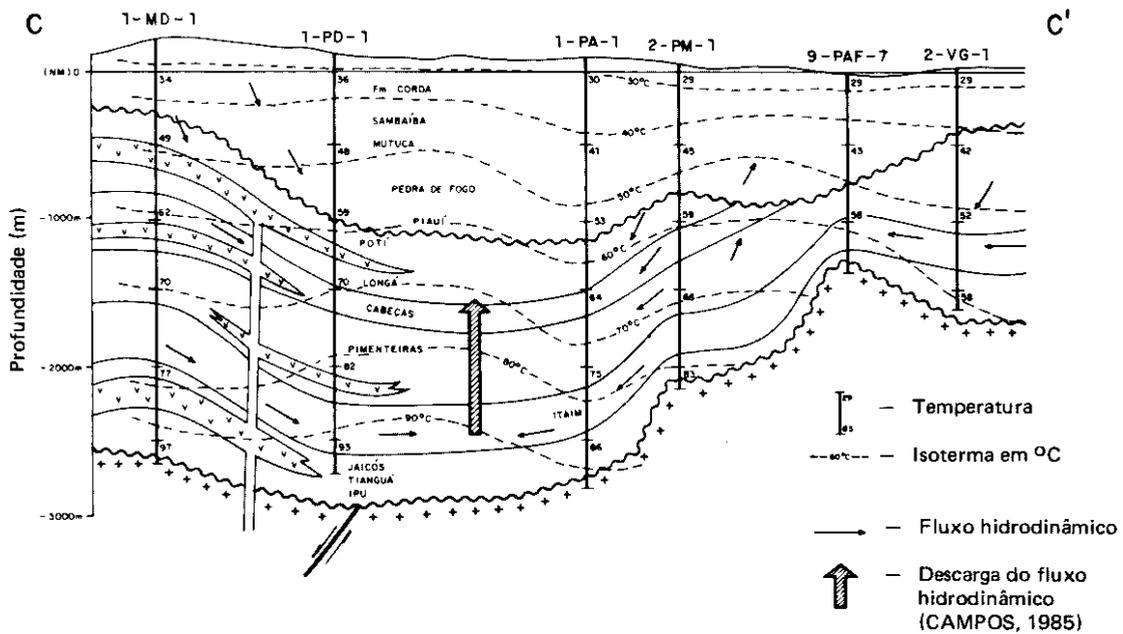


Fig. 14 - Seção geológica centro – borda norte (CAMPOS, 1985) da Bacia do Parnaíba, com superposição de isothermas.

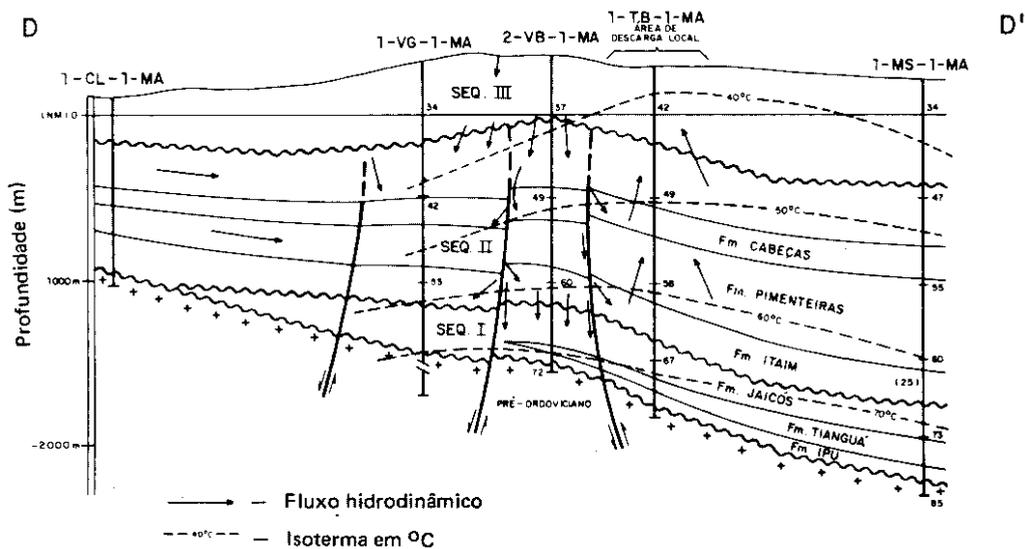


Fig. 15 - Seção geológica na área sudoeste da Bacia do Parnaíba (CAMPOS, 1985), com superposição de isothermas.

naíba:

- Conseguiu-se, pela associação das ferramentas geotérmica e hidrodinâmica, caracterizar as prováveis áreas de recarga e de descarga de fluidos na bacia;
- Considerando que as áreas intermediárias entre as de recarga e de descarga seriam as mais favoráveis ao armazenamento de hidrocarbonetos, optamos, dentre as áreas mais prospectáveis do ponto de vista geotérmico,

co, por aquelas localizadas na região centro-oeste da Bacia do Parnaíba, onde existem melhores condições geoquímicas para a maturação da matéria orgânica;

- Tanto quanto é válido para as demais ferramentas geológicas, recomenda-se que cada novo valor de temperatura obtido seja integrado a este trabalho, reinterpretando-se os resultados até então existentes.

AGRADECIMENTOS

Nosso especial agradecimento ao geólogo Egon Meister (PETROBRÁS/DEPEX) por sua colaboração e criteriosa revisão técnica do texto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, J. N. P. *Hidrodinâmica da Bacia do Parnaíba; Plays alternativos na pesquisa de hidrocarbonetos*. PE-

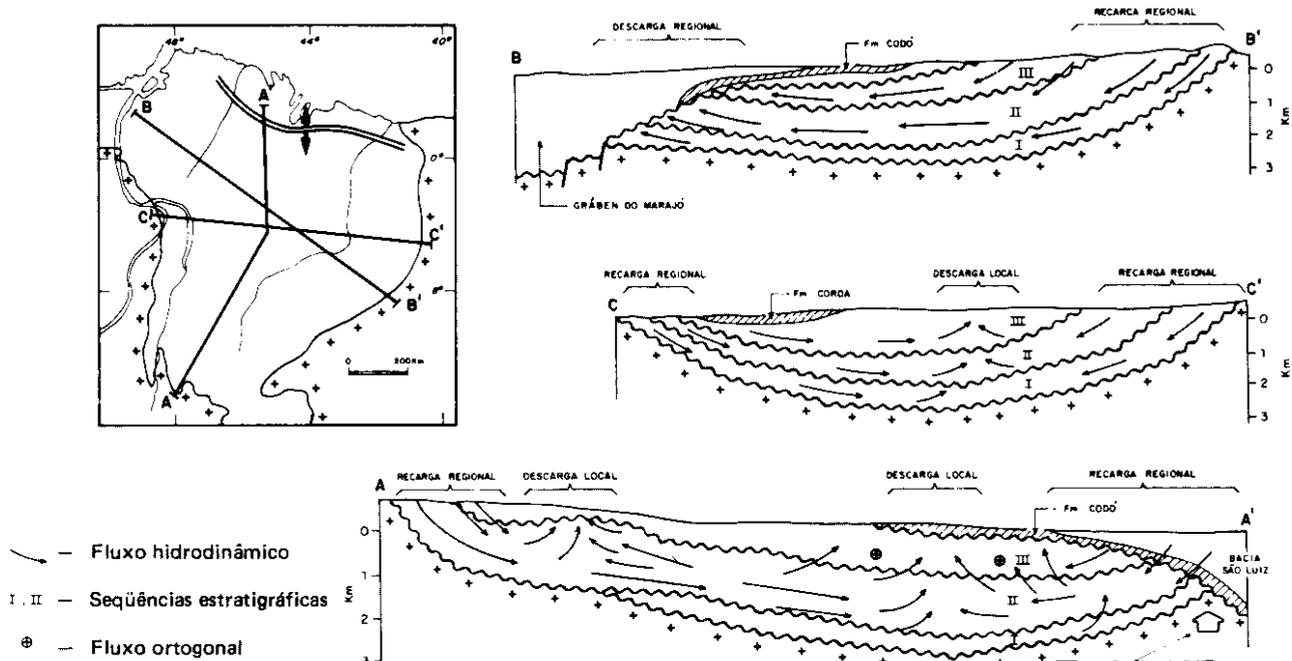


Fig. 16 - Modelo de circulação de fluidos na bacia, com apoio de indicações térmicas (modificado de CAMPOS, 1985).

TROBRÁS. DENOR. DINTER, 1985. 25 p. (Relatório interno, 567).

CAMPOS, J. N. P. & ZEMBRUSKI, S. G. *Hidrogeologia e fluxo térmico da Bacia do Médio Amazonas*; relatório interno. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES, 1987.

CAPUTO, M. V.; MARQUES, L. F. P.; CARVALHO, L. C. A. *Desenvolvimento tectônico das bacias do Amazonas e Parnaíba*; relatório interno. Belém, PETROBRÁS. DENOR, 1983.

CAROZZI, A. V.; FALKENHEIN, F. M.; CARNEIRO, R. G.; ESTEVES, F. R.; CONTREIRAS, C. J. *Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonática da Bacia do Maranhão*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. SINTEP, 1975. 48 p. (Ciência-Técnica-Petróleo. Seção Exploração de Petróleo, 2).

DEPEX, Mapa geológico da Bacia do Parnaíba, 1980.

HITCHON, B. Geothermal gradients, hydrodynamics and hydrocarbon occurrences, Alberta, Canada. *AAPG Bull.*, 68 (6): 713-43, 1984.

JONES, F. W.; MAJOROWICZ, J. A.; LINVILLE, A.; OSADETZ, K. G. The relationship of hydrocarbon occurrences to geothermal gradients and time-temperature indices in Mesozoic formations of southern Alberta. *Bull. Can. Pet. Geol.*, 34

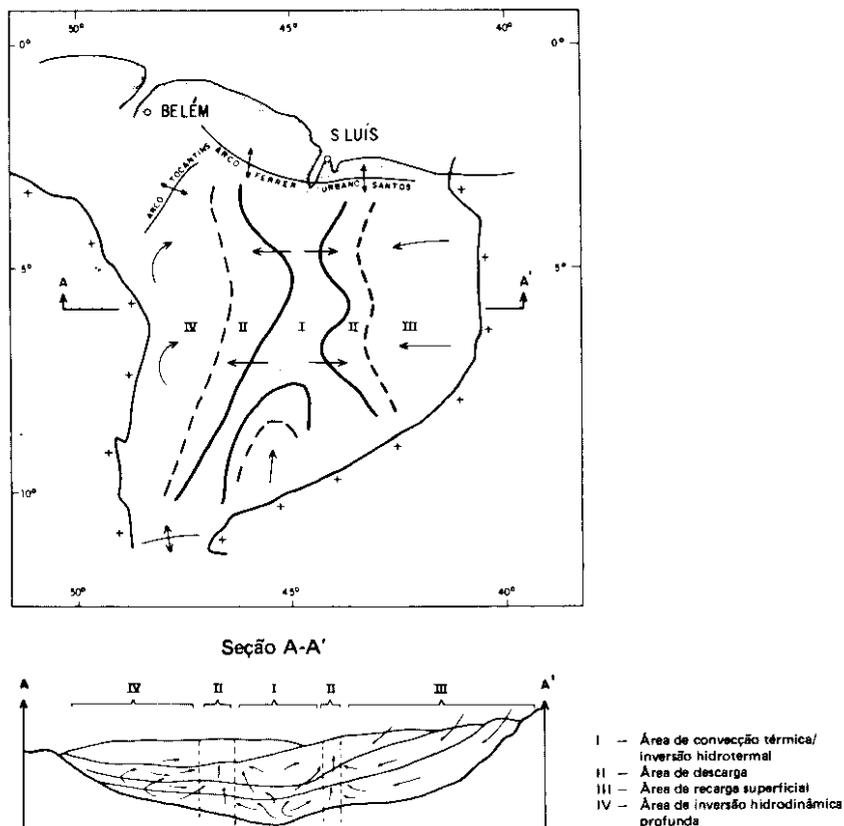


Fig. 17 - Modelo esquemático enfocando a área de maior gradiente geotérmico da bacia e as áreas de recarga e descarga de fluidos.

- (2): 226-39, June 1986.
- KINGSTON, D. R.; DISHROON, C. P.; WILLIAMS, P. A. Global basin classification system. *AAPG Bull.*, 67 (12): 2175-93, 1983.
- MEISTER, E. M. *Gradientes geotérmicos nas bacias sedimentares brasileiras*; relatório interno. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. DEXPRO. DIVEX. SETIN, 1973. 19 p.
- MEISTER, E. M. *A geologia histórica do petróleo na Bacia de Campos*; relatório interno. Rio de Janeiro. PETROBRÁS. DEPEX, 1984.
- OVNATANOV, S. T. & TAMRAZYAN. Thermal studies as a technique in subsurface structural investigations. *Geothermics*, 2: 1184-90, 1970. Special issue.
- ROBERTS III, W. H. *Some uses of temperature data in petroleum exploration*. In: UNCONVENTIONAL METHODS IN EXPLORATION FOR PETROLEUM AND NATURAL GAS, Dallas, 1979. *Proceedings*. Dallas, Southern Methodist University Press, 1979. v. 1, p. 8-49.
- ZEMBRUSCKI, S. G. *Gradiente geotérmico das bacias terrestres brasileiras*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES, 1984a. 19 p. (Relatório CENPES, 383).
- ZEMBRUSCKI, S. G. *Estudo geotérmico da Bacia do Médio Amazonas e sua implicação nas análises estratigráficas e estruturais*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES, 1984b. 16 p. (Relatório CENPES, 521).
- ZEMBRUSCKI, S. G. & THOMAZ FILHO, A. *Correlação geotérmica dos campos de hidrocarbonetos do Recôncavo*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES, 1985, 38 p. (Relatório CENPES, 599).
- ZEMBRUSCKI, S. G. *Estudo geotérmico da Bacia de São Luís*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES, 1985. 31 p. (Relatório CENPES, 648).

ABSTRACT

The geothermal parameters of the Parnaíba Basin were studied in association with the hydrodynamic interpretation by CAMPOS (1985). The relationship between the established anomalies with the lithology of the sedimentary sequence, with the basement proximity and/or with the lithosphere heat provenience was also considered. The subsurface fluid flow and the location of the directional effects led to the deduction of the fluids recharge areas.

The Parnaíba Basin has a higher thermal

condition than the similar Brazilian Paleozoic intracraton basins (MEISTER, 1973; ZEMBRUSCKI, 1984). This indicates the presence of some anomalous factor which could be caused by either: (1) the thick coarse clastic sequence, poorly compacted, in the upper half part of the column, that probably hampers the vertical heat transit and or; (2) the Devonian shale sequence plus some other heat insulating shales.

The observed geothermal and

hydrodynamic patterns could also have resulted from the intracratonic and Paleozoic nature of the basin with a centripet hydrodynamic regime (mature regime): cold superficial waters inflow in the basin through the wide south and east outcropping units, reaching greater depths, into depocenter, the waters are heated, then suffering convection action and have reverted its flow moving, tending to ascend up to the surface. The intermediate zones seem to hold the best possibilities to trap less dense fluids like hydrocarbons.