

POTENCIAL DE RESERVATÓRIOS PROFUNDOS NA FORMAÇÃO SERRARIA, BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS

POTENTIAL FOR DEEP RESERVOIRS IN SERRARIA FORMATION, SERGIPE-ALAGOAS BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL

Antônio Jorge Vasconcellos Garcia⁽¹⁾, Luiz Fernando De Ros⁽²⁾, Rogério Schiffer de Souza⁽³⁾ e Carlos Henrique Lima Bruhn⁽⁴⁾

RESUMO – A paleogeografia, proveniência, ambiente deposicional, e as histórias diagenética e de soterramento da Formação Serraria (Neocomiano da Bacia de Sergipe-Alagoas) foram analisadas visando a elaboração de modelos para a prospecção de reservatórios profundos. A Formação Serraria foi depositada por correntes fluviais entrelaçadas que atravessaram uma larga depressão cratônica desde N-NW, antes da ruptura do Gondwana. Foram definidos quatro domínios diagenéticos, dois dos quais com potencial para a ocorrência de reservatórios profundos. O domínio 1, incluindo o campo marítimo de Caioba e as áreas terrestres adjacentes, foi submetido a diagenese de soterramento no Neocomiano, seguidos de falhamento, basculamento e soergimento ainda no final do Neocomiano e início do Barremiano. Águas meteóricas, infiltradas pela discordância pré-aptiana e por falhas, dissolveram grande parte do cimento carbonático e dos grãos de feldspato. A abundante porosidade secundária foi apenas parcialmente reduzida durante o novo soterramento. O domínio 2, baseado nos arenitos do campo marítimo de Robalo (4 200 m), mostra preservação de porosidade pela saturação precoce por hidrocarbonetos, propiciada pela rápida subsidência durante a fase *rift*. Reservatórios profundos do tipo Caioba são prospectáveis através de uma análise detalhada das áreas de suballoramento e das grandes falhas ao longo da discordância pré-aptiana e das histórias de soterramento dos principais compartimentos estruturais. Reservatórios profundos do tipo Robalo são prospectáveis nos blocos mais ocidentais e profundos da bacia, que mantiveram a estruturação desde a fase *rift*. A prospecção de reservatórios profundos da Formação Serraria é muito importante no esforço para reverter a queda de produção de petróleo na bacia.

(Originais recebidos em 10.12.90.)

ABSTRACT – The paleogeography, provenance, depositional environment, and the diagenetic and burial histories of Serraria Formation (Neocomian of Sergipe-Alagoas Basin, Northeastern Brazil) have been analyzed to establish the principles for prospecting for deep reservoirs. The unit was deposited by braided fluvial streams crossing a wide cratonic sag from the north-northwest, before the rupture of Gondwana. Four diagenetic domains were defined, two of which have potential for the development of deep reservoirs. Domain 1, including the offshore Caioba oilfield and adjacent onshore areas, suffered Neocomian subsidence and burial diagenesis, followed by faulting, tilting and uplifting still by the end of Neocomian and beginning of Barremian. Meteoric waters infiltrated through pre-Aptian unconformity and major faults and dissolved most of the carbonate cement and feldspar grains. The abundant secondary porosity was only partially reduced during the subsequent burial. Domain 2, established from the study of the deep (4,200 m) sandstones in the offshore Robalo Field, shows porosity preservation by early hydrocarbon saturation related to a very rapid rift subsidence. Deep reservoirs of the Caioba Model may be discovered following a detailed analysis of the subsiding areas and major faults along the pre-Aptian unconformity, and the burial histories of the main structural compartments. Deep reservoirs of the Robalo Model are predictable in the eastern, deeper blocks of the basin, which kept the rift-phase structures. The search for deep Serraria reservoirs is very important in the attempt to reverse the hydrocarbon production decrease in the basin.

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

- 1 - Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Morro do Cruzeiro, CEP 35400, Ouro Preto, MG.
- 2 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Mineralogia e Petrologia, Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, CEP 91500, Porto Alegre, RS.
- 3 - Setor de Geologia para Exploração (SEGEX), Divisão de Geologia e Engenharia de Reservatórios (DIGER), Centro de Pesquisas (CENPES), Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, CEP 21910, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 4 - McMaster University, Department of Geology, 1280 Main Street West, Hamilton, Ontario L8S 4M1, Canadá.

1 – INTRODUÇÃO

Na Bacia do Recôncavo, os arenitos da Formação Sergi, da sequência pré-*rift*, constituem-se nos mais importantes reservatórios da bacia.

Entretanto, o mesmo não ocorre na vizinha Bacia de Sergipe-Alagoas, que tem na Formação Serraria essencialmente o equivalente à Formação Sergi nos seus contextos estratigráfico e deposicional.

Em diversos blocos, estruturalmente mais rasos da faixa ocidental da bacia (fig. 1), os arenitos da Formação Serraria mostram condições permoporosas bastante pobres. Já em 1969, Olivatti e Ribeiro praticamente condenaram a unidade e desestimularam novos estudos a seu respeito. A descoberta do Campo de Caioba desfez temporariamente a opinião pessimista em torno dos reservatórios da Formação Serraria. Neste campo, situado na porção imersa, mais oriental da bacia, os arenitos da Formação Serraria ocorrem com boas características permoporosas à cerca de 2 000 m de profundidade (Silva e Della Fávera, 1972).

Com base nestes dados e na comparação com o desempenho dos reservatórios da Formação Sergi na Bacia do Recôncavo, Franke e Silva (1975) realizaram uma revisão dos limites exploratórios dos reservatórios Serraria, redefinindo para 3 500 m o "limite viável de profundidade exploratória" para a Formação Serraria. Figueiredo (1978) destacou, entretanto, que a área prospectável da Formação Serraria estaria fundamentalmente limitada pela profundidade, desde que abaixo dos 4 000 m os efeitos da diagênese tivessem deteriorado seu potencial de permeabilidade. Fugita (1974) salientou a importância da discordância pré-aptiana na geração de trapas na Formação Serraria e em outras unidades da bacia.

Mais recentemente, Falkenhein *et al.* (em edição) desenvolveram um estudo geológico integrado da Bacia de Sergipe-Alagoas. A análise petrológica não foi, entretanto, discriminada para os diferentes reservatórios, limitando-se à construção de um "modelo diagenético geral" para todas as unidades analisadas,

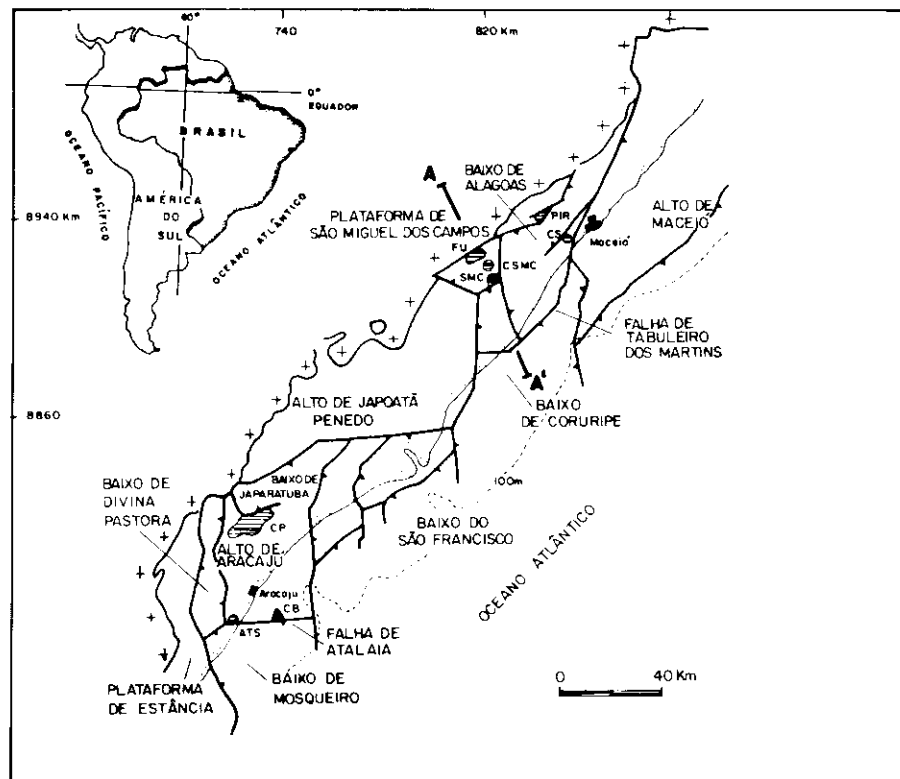


Fig. 1 - Compartimentos estruturais da Bacia de Sergipe-Alagoas.
Fig. 1 - Structural compartments of Sergipe-Alagoas Basin.

portanto de difícil aplicabilidade para estudos específicos sobre a Formação Serraria.

A aplicação de limites de prospectividade dos reservatórios Serraria para toda a bacia, que já havia sido algo abalada pela descoberta de Caioba, foi posta em cheque pelos recentes resultados do poço 6-RB-18-SES (Souza, 1987), onde os arenitos Serraria apresentam até 18% de porosidade a mais de 4 200 m. Esta ocorrência confirma a necessidade urgente de se reavaliar o potencial dos reservatórios Serraria na bacia, particularmente em estruturas consideradas profundas.

Utilizando uma abordagem estatística, Bruhn, Cainelli e Matos (1988) analisaram o comportamento diferencial dos reservatórios Serraria nas porções emersa e imersa da bacia (fig. 2), invocando dois aspectos básicos: primeiro, de que os reservatórios pré-rift atingiram profundidades superiores a 3 000 m já no Andar Buracica (Cretáceo Infe-

rior) em grande parte da porção emersa da bacia, enquanto que no mar, o soterramento a maiores profundidades só se deu no Terciário; segundo, de que na porção imersa e em algumas áreas terrestres, "tanto folhelhos das formações Barra de Itiúba e Coqueiro Seco (seção *rift*), como folhelhos da Formação Muribeca (seção transicional para a fase *drift*) estão maduros e/ou senis. Portanto, nestas áreas, teríamos não apenas dois geradores de hidrocarbonetos, como também duas fontes em potencial de solventes orgânicos para o desenvolvimento de porosidade secundária". Estas observações possuem tal repercussão exploratória na bacia que merecem sem dúvida um exame criterioso.

Garcia (em edição) realizou recentemente uma completa análise sedimentológica e petrológica da Formação Serraria em toda a bacia, que constitui a base do presente trabalho. Neste estudo, o autor ressalta a importância da infiltração meteórica associada à discordância

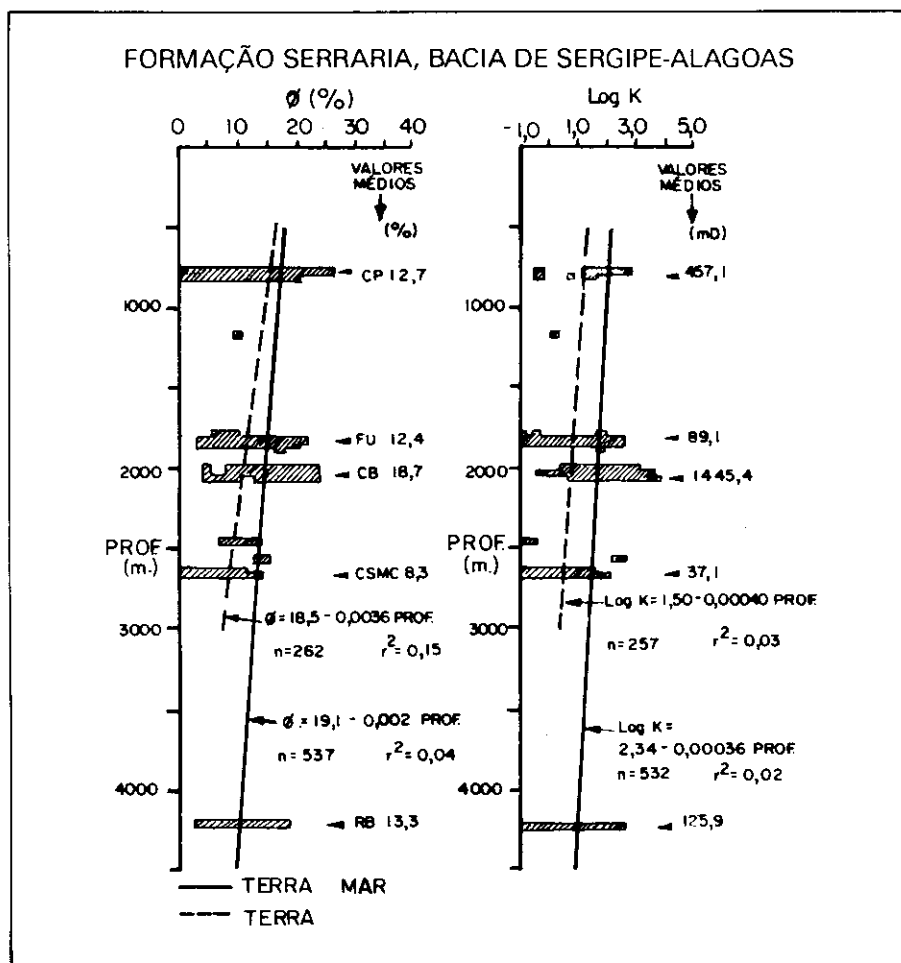


Fig. 2 - Distribuição da porosidade e da permeabilidade em função da profundidade para os reservatórios da Formação Serraria, ilustrando a melhor qualidade dos reservatórios dos campos imersos de Caioba (CB) e Robalo (RB), em relação aos campos emersos de Carmópolis (CP), Cidade de São Miguel dos Campos (CSMC), e Furado (FU). Estão indicadas as médias por campo (Bruhn et al., 1988).

Fig. 2 - Porosity and permeability distribution with depth for the reservoirs of Serraria Formation, showing the best quality of the reservoirs of the offshore Caioba (CB) and Robalo (RB) oilfields, relatively to the onshore Carmópolis (CP), Cidade de São Miguel dos Campos (CSMC) and Furado (FU) oilfields. The mean values are indicated for each field (Bruhn et al., 1988).

pré-aptiana, da influência de um ou dois geradores e das histórias de soterramento diferenciadas na preservação e produção de porosidade.

A Bacia de Sergipe-Alagoas vive hoje uma grave crise exploratória, reflexo da exaustão das grandes estruturas rasas e do baixo índice de sucesso da prospecção de reservatórios turbidíticos na seção mari-

nha (Catto, Feijó e Aquino, 1989). A confirmação do potencial representado pelos reservatórios profundos da Formação Serraria parece se revestir de uma grande importância para a reversão deste quadro. A possibilidade de os reservatórios Serraria exibirem boa porosidade saturada com óleo e gás em estruturas profundas nas porções imersa e emersa da bacia é bastante elevada, tal como indica a ocorrência de Robalo.

Neste contexto, os objetivos deste trabalho são de alertar para o potencial exploratório dos reservatórios Serraria profundos, e de procurar esclarecer as condições genéticas responsáveis pela preservação e/ou geração dos comparativamente elevados valores de porosidade nos campos de Caioba e Robalo. Os principais enfoques da análise desenvolvida visam: a discutir o condicionamento paleoambiental e a proveniência da Formação Serraria; a condensar as informações sobre a deposição da unidade; a estabelecer a seqüência de processos diagenéticos e sua influência sobre a porosidade e a permeabilidade; a procurar explicar as condições genéticas de evolução da porosidade e esboçar um modelo geoquímico-petroológico; e a sugerir áreas de aplicação deste modelo e discutir as suas repercussões exploratórias.

2 - PALEO GEOGRAFIA E SEDIMENTAÇÃO DA FORMAÇÃO SERRARIA

A Formação Serraria foi depositada no Neocomiano (fig. 3) por um sistema fluvial de canais entrelaçados proveniente de N-NH, ao qual associavam-se depósitos eólicos e lagos efêmeros. Esta associação de ambientes deposicionais distribuía-se em uma ampla planície semi-árida, de drenagem interna, ocupando uma área de aproximadamente 500 000 km² no interior do continente Gondwânico, pouco antes da separação entre a América e a África (fig. 4).

O sistema fluvial alimentador dos depósitos da Formação Serraria configura-se como um sistema de grande extensão (aproximadamente 400 km), desde as cabeceiras,

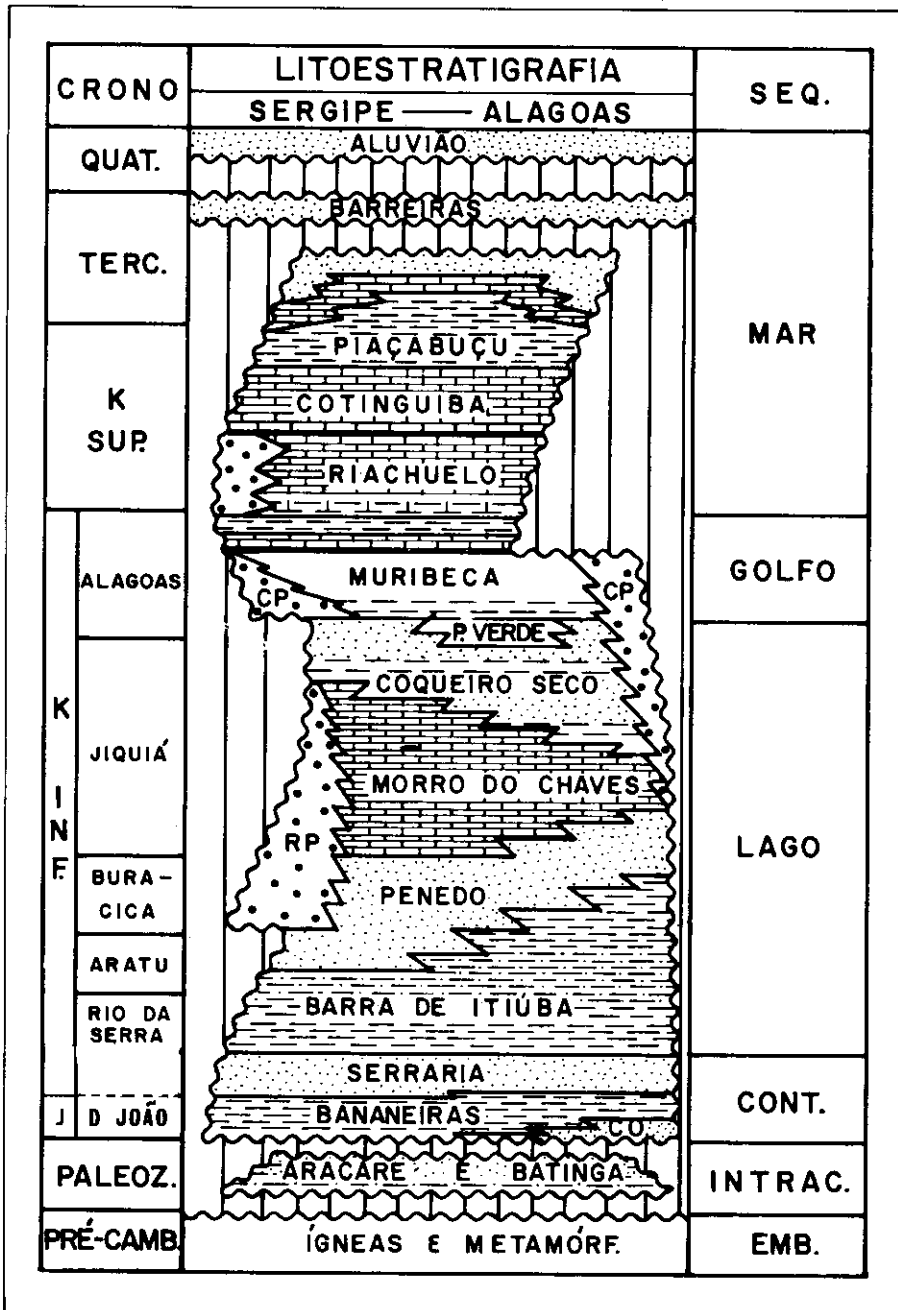


Fig. 3 - Coluna estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas (modificado de Schaller, 1969, apud Garcia, em edição).

Fig. 3 - Stratigraphic column of Sergipe/Alagoas Basin (modified from Schaller, 1969, apud Garcia, unpublished data).

no interior do Ceará, até a área de Sergipe-Alagoas. Estas afirmativas estão alicerçadas em dados de paleocorrentes, em análise compara-

tiva entre a composição detrítica dos arenitos da Formação Serraria e a mineralogia do embasamento na região considerada como área-

fonte, além de informações lito- e bioestratigráficas das demais bacias interiores do nordeste (Garcia, em edição). O modelo deposicional integrado, proposto como hipótese de trabalho a ser avaliada em estudos futuros, integra as formações Antenor Navarro, Serraria e Bananeiras (Garcia, em edição) (fig. 5).

A Formação Serraria foi subdividida em três intervalos litológicos (fig. 6): 1)- intervalo basal de arenitos finos e pelitos intercalados, transicionais para a Formação Bananeiras sotoposta; 2)- intervalo intermediário de arenitos médios a grosseiros e conglomerados e 3)- intervalo inferior de arenitos finos, e pelitos intercalados, transicionais para a Formação Barra de Itiúba e onde se insere o Arenito Caioba. Estes três intervalos podem ser reconhecidos, com relativa segurança, em perfis de raios gama dos poços que atravessam a unidade. Estas correlações rocha-perfil poderão ser estendidas ao traçado de mapas de isópacos e contorno estrutural de cada intervalo, cobrindo toda a bacia.

O intervalo arenoso intermediário foi compartimentalizado ainda em três subintervalos litologicamente distintos (fig. 6): dois de deposição fluvial, com níveis intermediários de retrabalhamento eólico.

O preenchimento da paleobacia teve seu início com a sedimentação dos pelitos lacustres e arenitos de frente deltaica e fluviais distais da Formação Bananeiras. Os arenitos finos basais e pelitos intercalados representam a passagem gradacional para a sedimentação predominantemente fluvial da Formação Serraria.

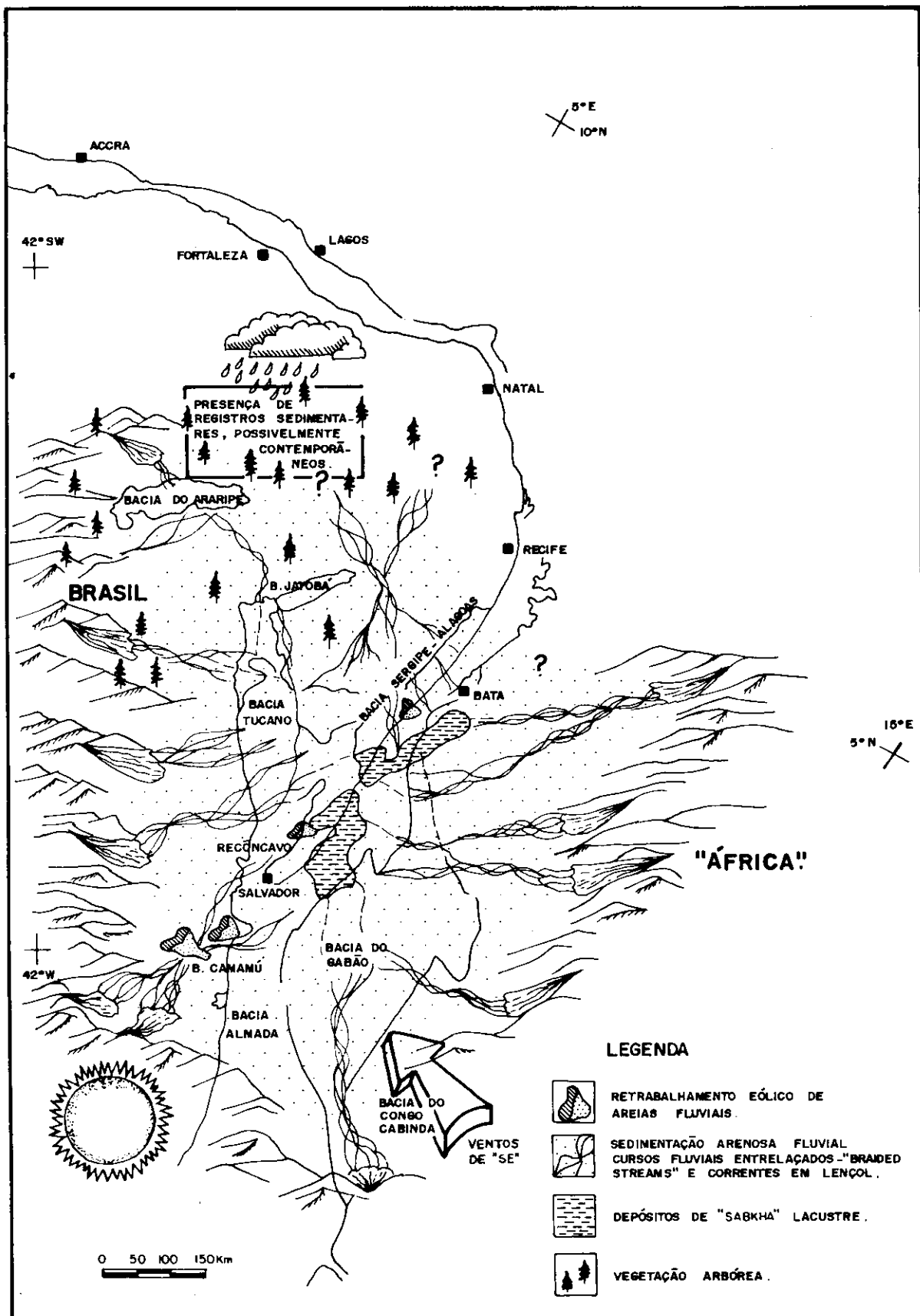


Fig. 4 - Mapa paleogeográfico esquemático da Depressão Afro-Brasileira no Continente de Gondwana, mostrando o padrão de sedimentação à época da deposição das formações Serraria e Sergi (Garcia, em edição).

Fig. 4 Schematic paleogeographic map of the Afro-Brazilian Depression in Gondwana Continent, at the time of the deposition of Serraria and Sergi formations (Garcia, unpublished data).

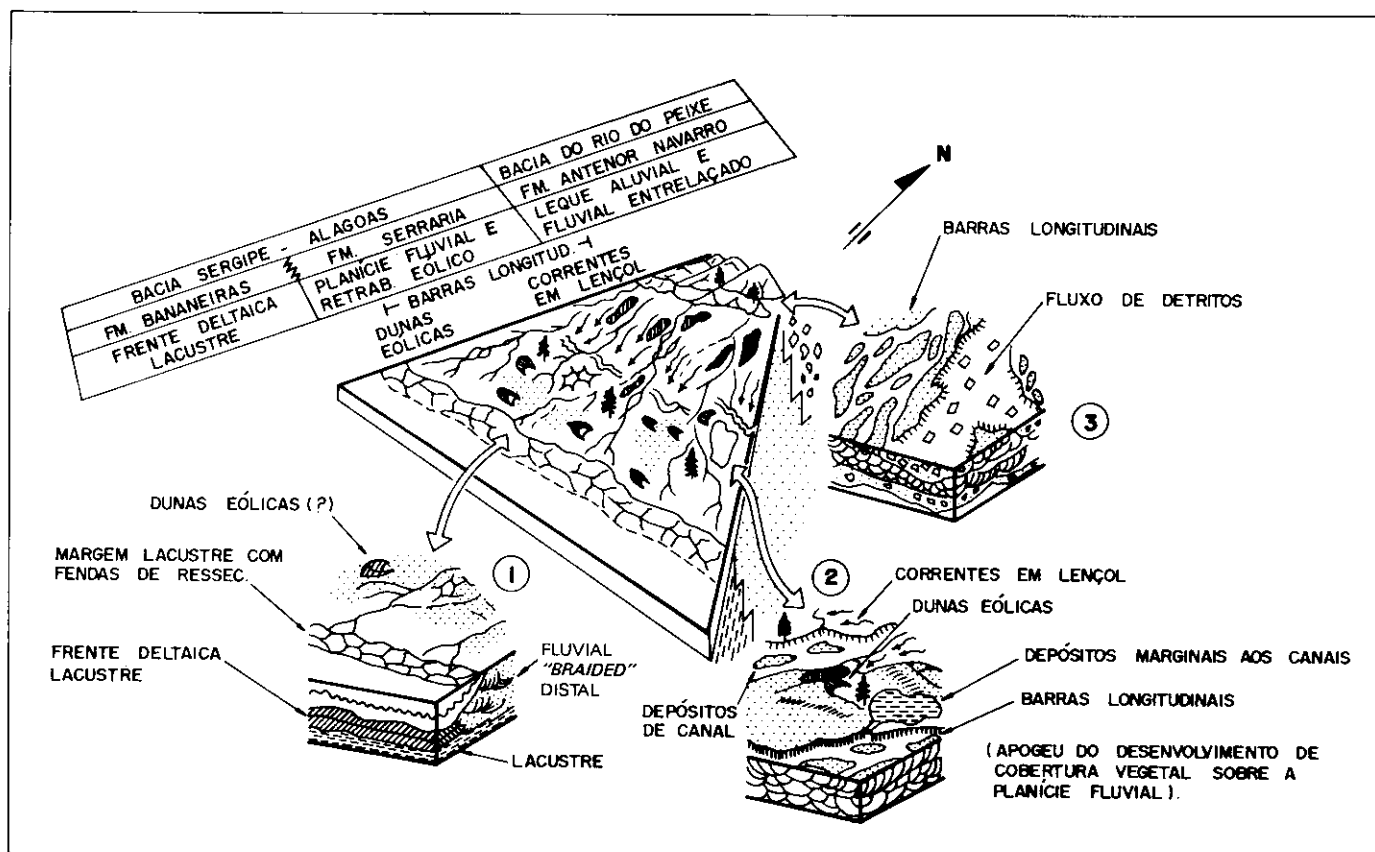


Fig. 5 - Modelo deposicional integrado da Formação Anterior Navarro, na Bacia do Rio do Peixe, e das formações Serraria e Bananeiras, na Bacia de Sergipe-Alagoas (Garcia, em edição).

Fig. 5 Integrated depositional model for the Anterior Navarro Formation, in Rio do Peixe Basin, and for the Serraria and Bananeiras formations, in Sergipe-Alagoas Basin (Garcia, unpublished data).

Um modesto tectonismo deve ter sido responsável pela implantação do ambiente fluvial na bacia. Os arenitos médios a grossos inferiores são indicativos de correntes acanaladas em porções medianas a distais do amplo sistema fluvial proveniente de N-NW. O subintervalo de sedimentação eólica teve sua origem e preservação devidas a um período de fraca atuação das drenagens, resultante da diminuição da pluviosidade nas cabeceiras e/ou de uma inatividade tectônica na área-fonte.

Em seguida, a sedimentação fluvial foi retomada, resultando na deposição de expressivo pacote de arenitos grossos e conglomerados, que hoje ocupam a porção média-superior da formação. A força erosiva e a rápida migração lateral das

correntes fluviais, neste período, foi responsável pela destruição da exuberante vegetação que se desenvolvia mais amplamente na planície aluvial anteriormente estabelecida (fig. 4).

A seguir, a sedimentação fluvial foi gradual, mas rapidamente afogada por um corpo lacustre relativamente raso, alimentado a partir do aumento de pluviosidade, com intervalos de limitada retomada da deposição fluvial (Garcia, em edição).

3 - PETROLOGIA DA FORMAÇÃO SERRARIA

Recentemente, foram concluídos estudos petrológicos de detalhe

dos arenitos da Formação Serraria (Garcia, em edição), com base em amostras de superfície e de testemunhos de 40 poços perfurados na formação, cobrindo praticamente toda a bacia. A caracterização de constituintes originais do arcabouço, das fases autigênicas e processos associados, realizados através da petrografia óptica convencional, permitiu o estabelecimento dos processos diagenéticos e da sequência evolutiva na unidade. A partir desta caracterização, foi efetuada a quantificação dos componentes através da contagem de pontos em 181 lâminas delgadas, bem como a avaliação comparativa de outras 66. Os estudos de detalhe envolveram ainda análises complementares, buscando atender à caracterização de alguns aspectos não plenamente compreendi-

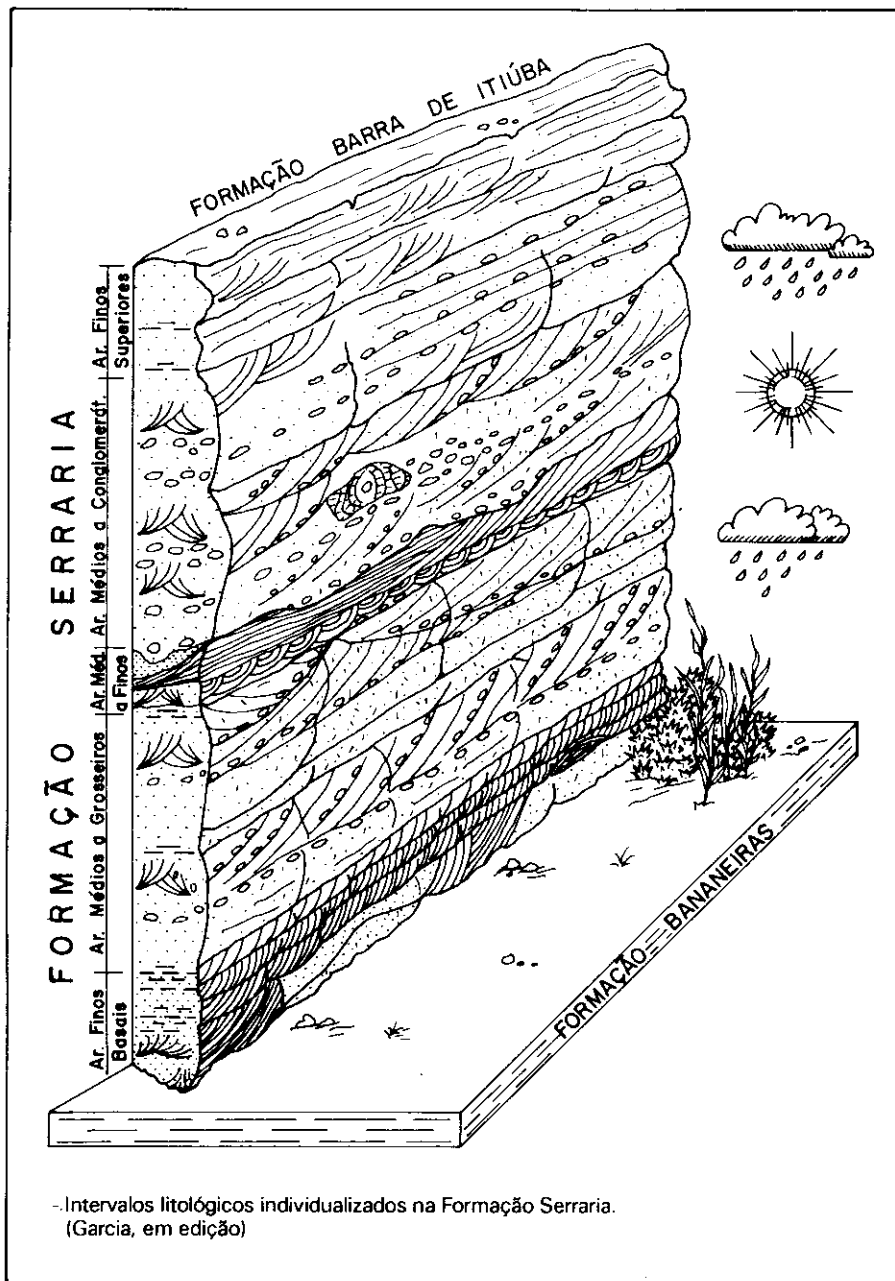


Fig. 6 - Intervalos litológicos individualizados na Formação Serraria (Garcia, em edição).
 Fig. 6 - Lithologic intervals of Serraria Formation (Garcia, unpublished data).

dos através da petrografia convencional. Executaram-se análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV - SEM), difração de raios X (DRX - XRD), microscopia por elétrons retroespalhados (BSE), análises em microsonda de espectrômetro de energia dispersiva (EDS), e geoquímica de isótopos estáveis de carbono e oxigênio, objetivando a melhor definição da composição das diferentes fases autigênicas, bem como estabelecer a seqüência de processos.

As considerações apresentadas neste trabalho estão embasadas nos procedimentos e interpretações constantes nos estudos detalhados referidos.

3.1 - Os Domínios Diagenéticos na Formação Serraria

A integração das informações petrográficas, dos dados litoestratigráficos e estruturais, com a história

de soterramento da Formação Serraria, levaram à individualização de quatro domínios diagenéticos (fig. 7). A distinção entre estes quatro domínios, em termos de evolução dos processos diagenéticos, está relacionada com: 1)- a presença de uma ou duas unidades de rochas geradoras na área; 2)- o tempo do início da geração e duração desta para cada um dos geradores; 3)- a entrada ou não de águas meteóricas no reservatório, associada à fase de discordância pré-Muribeca, e, por fim, 4)- a disposição dos domínios em relação à litofaciologia definida durante a deposição da unidade.

O domínio diagenético 1 compreende as regiões de Caioba, Camorim, Atalaia-Sul, Aracaju, Carmópolis e o poço 1-UV-1-SE, (fig. 7), cobrindo um intervalo de espessura de cerca de 2 540 m (de 805 m a 3 357 m de profundidade).

A evolução diagenética no domínio 1 (fig. 8) foi influenciada pela atuação de dois geradores de hidrocarbonetos (geradores continentais das formações Barra de Itiúba e Coqueiro Seco, e gerador marinho-transicional da Formação Muribeca) e por uma fase de infiltração de águas meteóricas, que atingiu o reservatório Serraria durante a exposição pré-aptiana (discordância pré-Muribeca). Nos poços mais próximos à faixa de exposição da formação, é evidente a intensidade dos processos meteóricos.

São características deste domínio: a presença de quartzarenitos gerados através de processos diagenéticos (Q98, F2, L0), cimentados por dolomita ferrosa (teor médio de 5,4% e máximo de 38%), parcial ou totalmente dissolvida. Partindo de

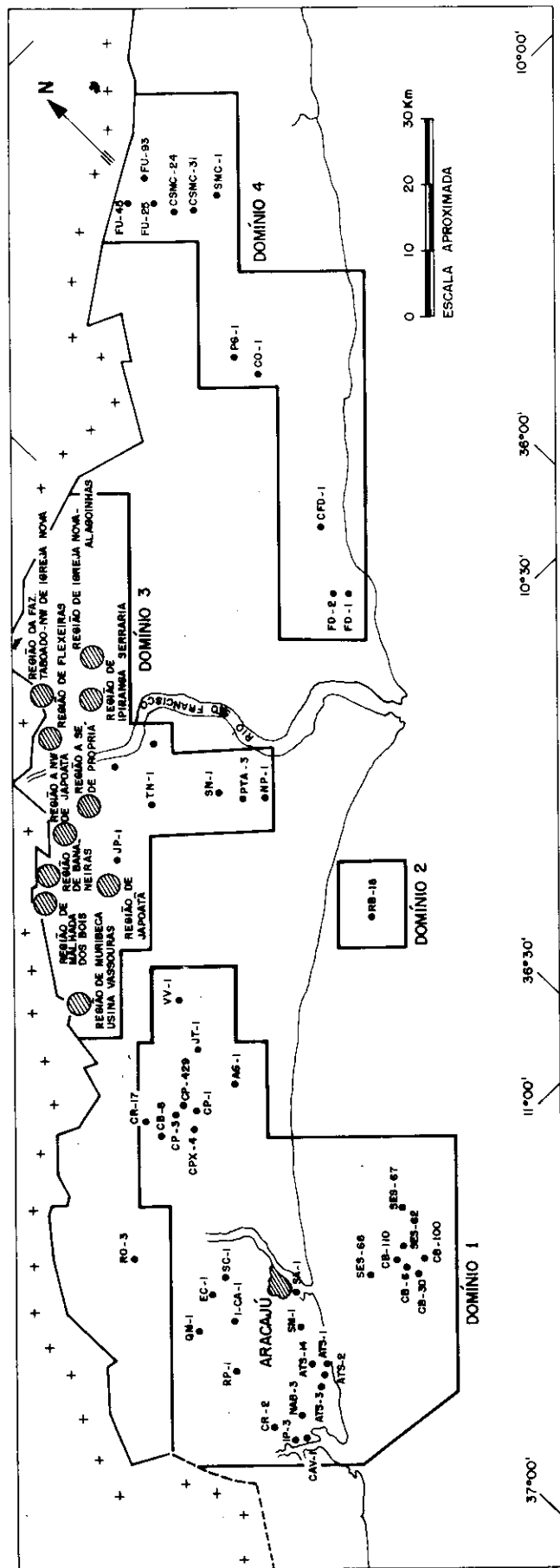


Fig. 7 - Domínios diagenéticos da Formação Serraria na Bacia de Sergipe-Alagoas.
 Fig. 7 - Diagenetic domains of Serraria Formation in Sergipe Alagoas Basin.

uma composição original subarco-siana (Q82, F16, L2), pode-se acompanhar a progressiva eliminação dos feldspatos (especialmente dos potássicos), associada a zonas de infiltração meteórica. Esta dissolução parcial ou total de feldspatos resultou na intensa precipitação de caulinita neste domínio (teor médio de 4,5% e máximo de 24%). A oxidação de fases ferrosas mesodiagenéticas (particularmente pirita e dolomitas ferrosas) e valores relativamente elevados de porosidade total (moda de 20%) também são características importantes deste domínio.

A compreensão da seqüência diagenética (fig. 8) e o reconhecimento de áreas influenciadas por duas rochas geradoras distintas permitem caracterizar duas seqüências evolutivas distintas para os arenitos deste domínio diagenético.

Nos setores de Caioba, Camorim, Atalaia Sul e Aracaju, a entrada dos hidrocarbonetos gerados a partir de folhelhos continentais do estágio *rift* (formações Barra de Iltiúba e Coqueiro Seco) deu-se entre as idades Buracica e Jiquiá (Falckner *et al.* em edição). Após, seguiu-se uma fase de soerguimento com exposição subaérea da Formação Serraria ao longo das margens de blocos basculados (discordância pré-Muribeca; fig. 9). Durante esta fase de exposição, a infiltração de água meteórica no reservatório promoveu importante lixiviação do cimento carbonático e dissolução intensa de feldspatos, seguida de precipitação de caulinita e degradação parcial do óleo. Novamente soterrado, o reservatório, com porosidade e permeabilidade substancialmente incrementadas, recebe os hidrocarbonetos do segundo gerador (Formação Muribeca, de idade Alagoas).

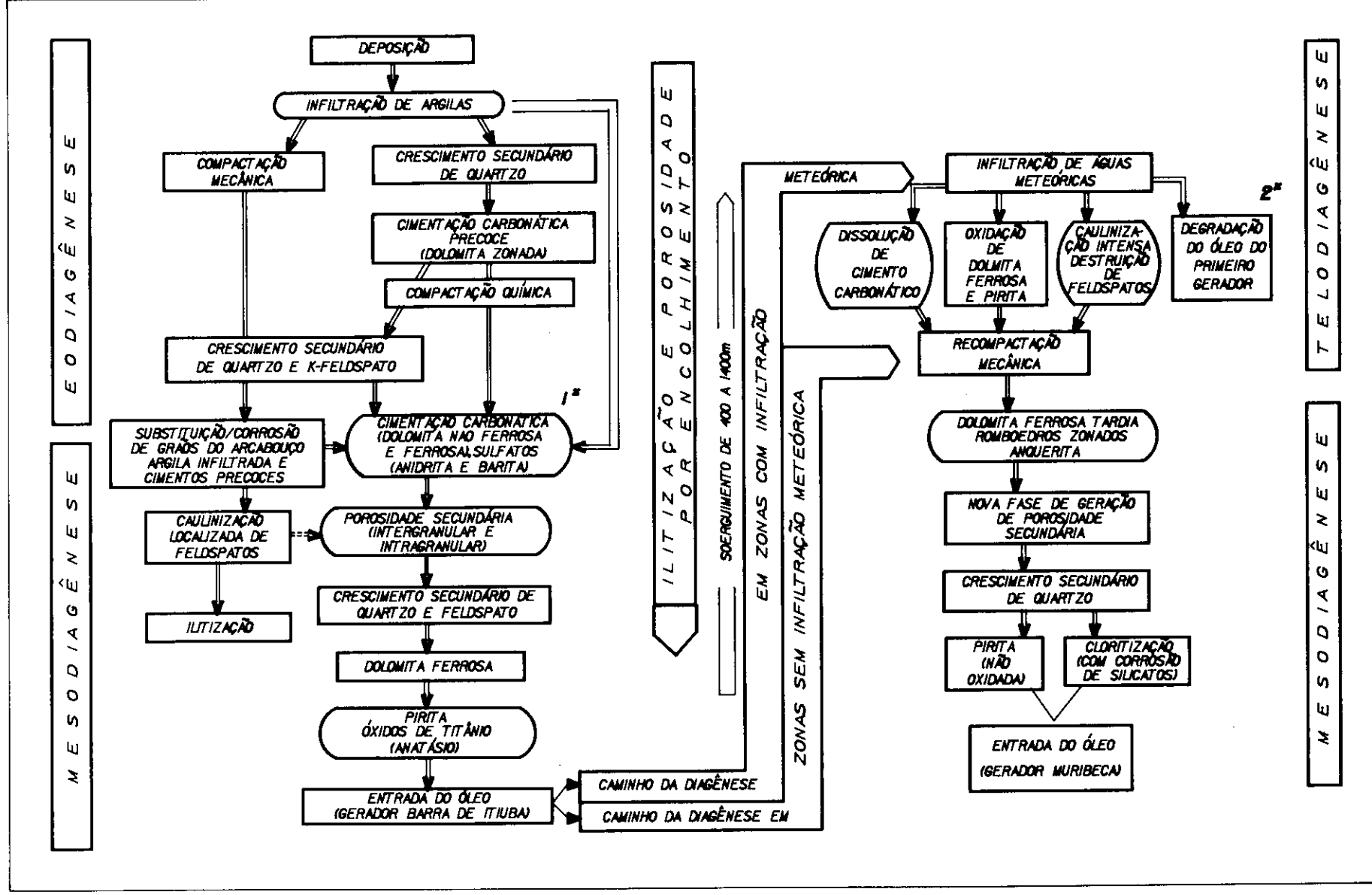


Fig. 8 - Evolução diagenética dos reservatórios Serraria no domínio 1.
 Fig. 8 - Diagenetic evolution of the Serraria reservoirs in domain 1.

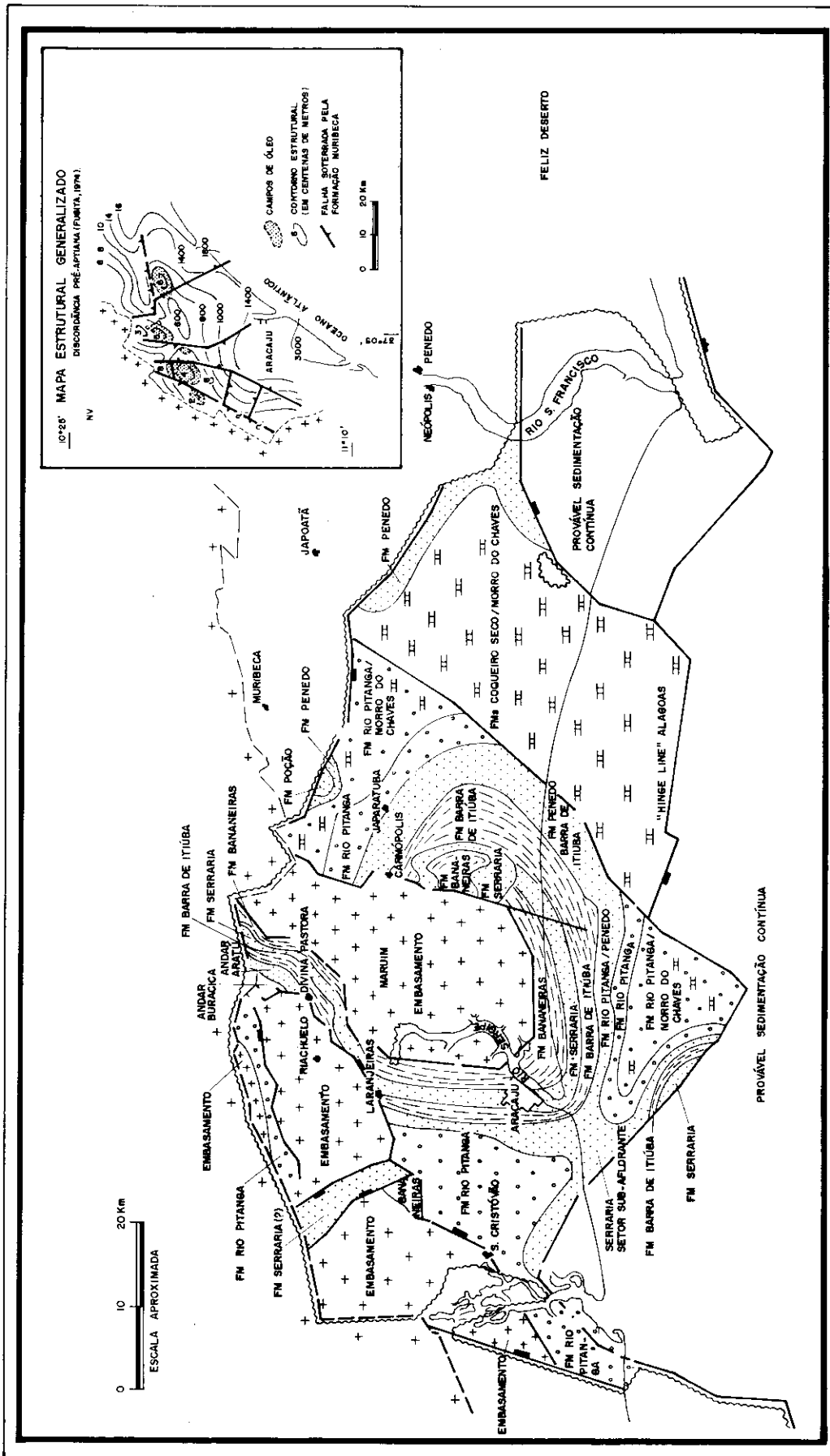


Fig. 9 - Mapa de subafioramento da discordância pré-Muribeca, ilustrando a faixa de exposição da Formação Serraria ao final da fase rift, ao longo das margens dos blocos basculados (modificado de Falkenhein *et al.* em edição).
 Fig. 9 - Subcropping map of the pre-Muribeca (pre-Aptian) unconformity at the end of rift phase, showing the exposure belt of Serraria Formation along the edges of tilted blocks (modified from Falkenhein *et al.* unpublished data).

Os setores de Carmópolis e do poço UV-1, igualmente afetados pela infiltração de água meteórica durante a discordância pré-Muribeca, possivelmente só passaram a receber significativo aporte de hidrocarbonetos a partir do Aptiano, após já ter ocorrido a ação meteórica no reservatório. Estes reservatórios não mostram mistura de hidrocarbonetos gerados na seção transicional com os gerados por folhelhos de estágio *rift*.

O domínio diagenético 2 foi definido com base em amostras do poço profundo 6-RB-18-SES (Campo de Robalo, porção imersa da bacia, fig. 7), envolvendo profundidades entre 4 216 m e 4 228 m. A porosidade presente nesses reservatórios (até 18% de porosidade total; até 11% de macroporosidade em lâmina delgada) é bastante significativa em relação à sua profundidade atual. São características deste domínio o aspecto predominantemente primário da porosidade intergranular, mas com uma dissolução praticamente total dos feldspatos, levando ao desenvolvimento de quartzarenitos diagenéticos (Q100, F0, L0) e à eliminação quase completa do cimento carbonático (dolomita ferrosa). A intensidade da dissolução dos feldspatos e a presença de restos cloritizados de caulinita parecem indicar que fluidos meteóricos alcançaram também este domínio, apesar da distância vertical entre a unidade e a discordância pré-Muribeca no campo. O basculamento de blocos, associado a zonas de falhas abertas, podem ter colaborado para o processo de infiltração.

O óleo contido no reservatório Serraria no poço RB-18 é proveniente de geradores continentais. O gerador marinho passou a contribuir apenas a partir do Maestrichtiano.

A infiltração meteórica teria afetado os reservatórios no domínio, após sua ocupação parcial por óleo de origem continental. O óleo morto, registrado através da petrografia, deve ter sido produzido pela degradação parcial do óleo continental. Os folhelhos continentais começaram a gerar no Andar Jiquiá (Falkenhein *et al.* em edição), portanto, antes da discordância, e voltaram a gerar no novo soterramento, provavelmente durante parte do Cretáceo Superior.

No poço RB-18 ocorre, a 4 227 m de profundidade, um nível de intensa cimentação, interpretado como um paleocontato óleo-água (Souza, 1987). Abaixo deste nível, a cimentação por crescimento secundário de quartzo mostra-se abundante (até 16%). A abundância de crescimento secundário de quartzo abaixo deste nível é contraposta por uma escassez/ausência do óleo morto, que ocorre comumente incluso nos crescimentos menos desenvolvidos, acima do paleocontato. Isto indica que o reservatório deve ter sido, ao menos parcialmente, ocupado por óleo antes desta primeira cimentação silicosa, e provavelmente antes da referida influência meteórica. A sequência diagenética observada no domínio 2 é representada na figura 10.

Os dois outros domínios diagenéticos individualizados não serão objeto específico do presente trabalho, desde que apresentam potencial reduzido para o desenvolvimento de reservatórios profundos de alta porosidade. São eles: domínio diagenético 3, envolvendo os setores de Japoatã – Penedo (subsuperfície) e afloramentos, e o domínio diagenético 4, em parte situado na Plataforma de São Miguel dos Campos, englobando os cam-

pos de Furado, Cidade de São Miguel dos Campos e São Miguel dos Campos, e envolvendo também os setores de Feliz Deserto e "SN" (fig. 7).

As histórias de soterramento e as interações de processos diagenéticos nos domínios 3 e 4 deram-se de forma diferenciada daquelas registradas nos domínios diagenéticos aqui detalhados, onde a atuação de um ou mais geradores e a infiltração de fluidos meteóricos participaram efetivamente no desenvolvimento de características favoráveis à ocorrência de reservatórios profundos. Deste modo, a avaliação negativa da Formação Serraria na bacia deve ser revista com base nos novos dados e interpretações desenvolvidas nos estudos realizados mais recentemente.

3.2 – Composição Detritica e Modificações Diagenéticas do Arcabouço

Quando analisados regionalmente, os arenitos da Formação Serraria se apresentam em média como subarcósios (Q90, F9, L1; de acordo com McBride, 1963), podendo localmente ocorrer verdadeiros arcósios líticos (Q64, F24, L12) nos níveis mais grossos a conglomeráticos (tabela I).

Em geral, os grãos de quartzo monocristalinos superam os policristalinos (52% contra 4%), particularmente nos domínios diagenéticos 1 e 2. Os feldspatos detriticos, menos comuns nos domínios 1, 2 e 3, são predominantemente potássicos (10-24%, contra 2-20% de plagioclásios) no domínio 4, onde estes constituintes chegam a compor em média 17% do arcabouço (Q80, F17, L3).

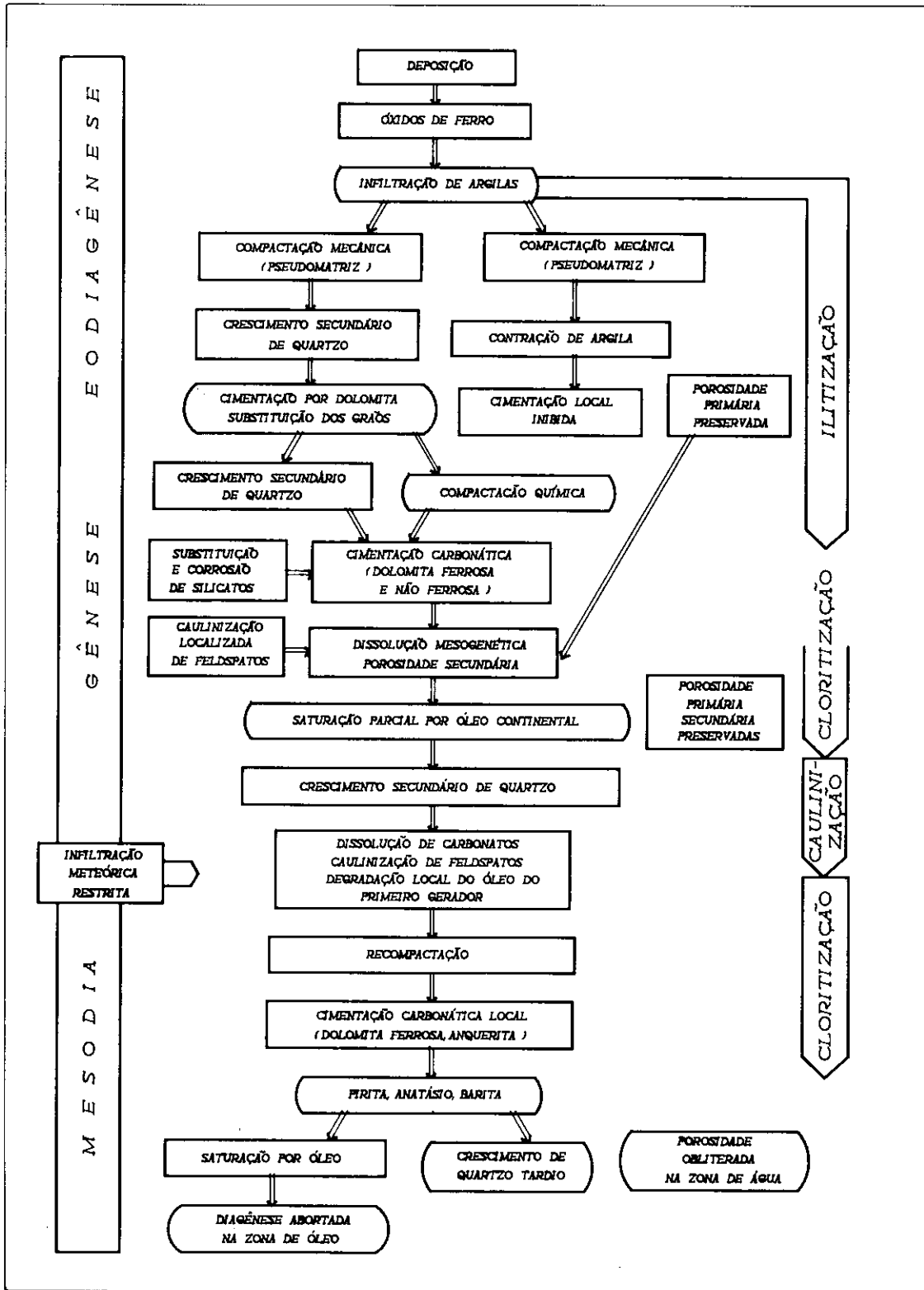


Fig. 10 Evolução diagenética dos reservatórios Serraria no domínio 2.
 Fig. 10 Diagenetic evolution of the Serraria reservoirs in domain 2.

TABELA I / TABLE I
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DETRÍTICA MÉDIA DOS DOMÍNIOS
DIAGENÉTICOS DA FORMAÇÃO SERRARIA
MEAN MINERALOGIC DETRITAL COMPOSITION OF THE DIAGENETIC
DOMAINS OF SERRARIA FORMATION

Composição Domínio Diagenético	Quartzo Total (Qz. Mono. + Qz. Poli. + Chert)	Feldspato Total (K-Feldspatos > Plagioclásios)	Fragmentos de Rochas Plutônicas
1	97,5	2,5	0,0
2	100,0	0,0	0,0
3 — Afloramentos	98,0	2,0	0,0
4 — Subsuperfície	97,0	3,0	0,0
	80,0	17,0	3,0
Toda Bacia	90,0	9,0	1,0

Os fragmentos de rochas plutônicas (rochas graníticas, gnáissicas e pegmatíticas) são comuns no domínio 4 e ausentes ou raros nos demais. Fragmentos de rochas metamórficas (biotita-muscovita, xistos e quartzitos) são raros em todos os domínios. Intraclastos pelíticos e fragmentos de solo do tipo caliche e silcrete estão comumente presentes, sendo localmente abundantes nos domínios 1 e 4, e mais comumente presentes no domínio 2.

Dentre os constituintes acessórios são reconhecidos, em ordem de abundância relativa, os seguintes: micas (muscovita > biotita), turmalina, zircão, bioclastos (localmente abundantes nos arenitos do topo da formação), anfibólio (hornblenda), rútilo, magnetita, ilmenita, leucóxênio, epidoto, esfero, granada, pirita e matéria orgânica vegetal.

Nos domínios diagenéticos 1, 2 e 3 registra-se uma significativa mudança na composição detrítica original dos arenitos da Formação Serraria, manifestada fundamen-

talmente na redução drástica dos feldspatos detríticos em relação ao domínio 4 (domínio diagenético 4: Q80, F17, L3; domínio diagenético 3: Q97/98, F3/2; L0; domínio diagenético 2: Q100, F0, L0; domínio diagenético 1: Q98, F2, L0).

A dissolução dos feldspatos acompanhada da precipitação de caulinita nos arenitos dos domínios 1, 2 e 3 reflete uma variação composicional do arcabouço, que é consequência direta da atuação de processos diagenéticos. Isto reafirma a importância da compreensão da evolução diagenética ao se procederem estudos de proveniência em arenitos.

Tendo em vista as modificações diagenéticas produzidas nos constituintes do arcabouço dos arenitos da Formação Serraria, a análise dos setores menos afetados por estes processos permite reconhecer uma mineralogia detrítica próxima do original, que é compatível com a área-fonte proposta, localizada no interior do Ceará.

A alteração eodiagenética dos constituintes detríticos foi o primeiro fator a atuar, modificando as características composicionais originais dos depósitos da Formação Serraria. Seguiram-se modificações mesodiagenéticas e, mais significativamente, telodiagenéticas nos domínios 1, 2 e 3. O somatório destes processos resultou em uma assembléia notavelmente madura.

4 – MODELO DIAGENÉTICO DOS RESERVATÓRIOS SERRARIA NOS DOMÍNIOS 1 E 2

A seqüência de processos diagenéticos caracterizados nos domínios 1 e 2, a distribuição das fases diagenéticas observadas e as condições geológicas atuantes em cada situação foram integradas na definição de modelos diagenéticos para os arenitos da Formação Serraria nesses domínios.

4.1 – Fatores Influentes na Diagênese da Formação Serraria

A complexa evolução diagenética comumente observada nos arenitos é o produto da interação dinâmica entre uma assembléia de minerais detríticos e fluidos submetidos a condições físicas e químicas em constante mutação. Na busca de equilíbrio com cada nova condição, minerais são dissolvidos, novos minerais são precipitados, porosidade é reduzida ou criada. Todo esse conjunto de processos é função de cinco parâmetros básicos: 1)- da composição detrítica original dos grãos; 2)- do ambiente de sedimentação; 3)- da história de soterramento sofrida pelo sedimento desde sua deposição; 4)- da histó-

ria térmica da bacia como um todo, ou do compartimento da bacia em questão; e 5)- da composição original e evolução diagenética dos folhelhos, carbonatos, evaporitos e outras litologias associadas aos reservatórios no pacote sedimentar.

Os sedimentos da Formação Serraria foram depositados em uma bacia cratônica, caracterizada por áreas-fonte submetidas a um continuado intemperismo, produto de um relevo rebaixado. Esta situação originou uma assembléia detrítica originalmente madura, de natureza quartzo-feldspática.

O ambiente de sedimentação fluvial entrelaçado (*braided*) promoveu a deposição de corpos, que amalgamados, atingem grande continuidade lateral. No intervalo médio da unidade, a maior energia do ambiente e o constante retrabalhamento originaram maiores espessuras de arenitos, enquanto que nas partes transicionais inferior e superior a menor energia do ambiente gerou arenitos compartimentados por folhelhos. O ambiente deposicional definiu a textura e a geometria dos corpos porosos, e, conseqüentemente, controlou o fluxo de fluidos durante a diagênese e influenciou diretamente os processos da diagênese precoce (eodiagênese).

Na história de soterramento dos reservatórios Serraria, foram particularmente importantes o soerguimento e a erosão ao final do estágio *rift*, responsável pela infiltração de água meteórica (telodiagênese), bem como a subsidência tardia de alguns dos blocos da porção imersa.

O regime térmico da bacia no estágio *rift*, com um episódio inicial de alto fluxo térmico (produzido

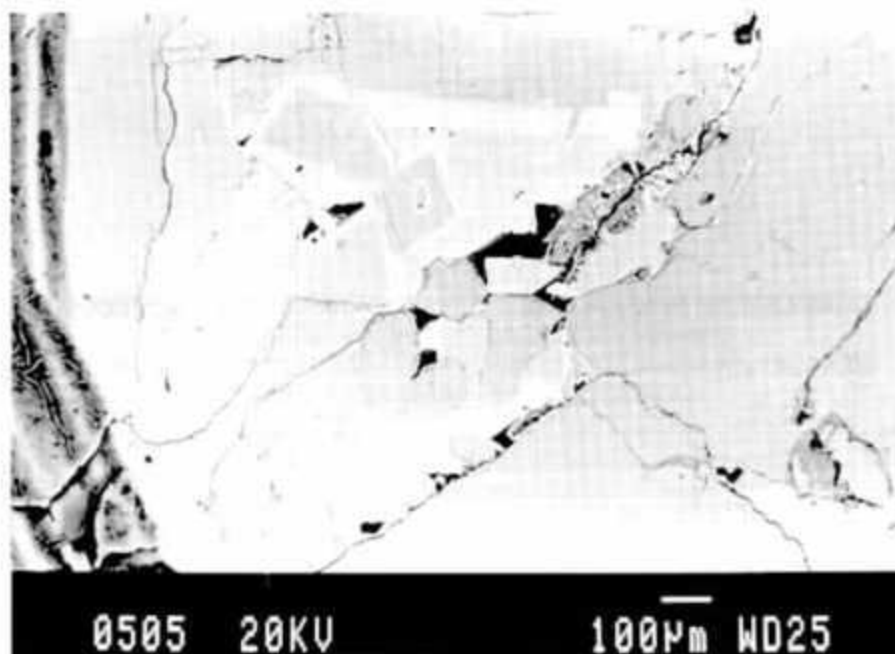


Foto 1 - Grandes cristais zonados de dolomita ferrosa cimentando e corroendo marginalmente os grãos do arcabouço a 1 995,5 m no poço 7-CB 6D-SES. Imagem de elétrons retroespalhados (BSE).
Photo 1 - Large zoned crystals of ferroan dolomite cementing and marginally corroding the framework grains at 1,995.5 m in 7-CB 6D-SES well. BSE image.

pelo estiramento da crosta e ascensão do manto), estimulou a geração e a ocupação precoce de alguns reservatórios por hidrocarbonetos, permitindo conseqüentemente a preservação da porosidade.

A presença de dois intervalos de folhelhos geradores, finalmente, parece ter sido importante na geração e na preservação de porosidade em determinadas áreas, de acordo com o proposto por Bruhn *et al.* (1988).

4.2 - Modelo Diagenético para o Domínio 1

As litologias da Formação Serraria no domínio 1 estiveram submetidas a uma primeira fase de subsidência durante o Neocomiano (entre 142 e 130 M.a.), durante a deposição do Andar Rio da Serra e parte do Andar Aratu. Ao final deste intervalo foram atingidas profundidades máximas em torno de 750 a 1 500 m. A estas profundidades, estimam-se temperaturas mínimas para a região em torno de 40-70 °C, com base em dados de isótopos de oxigênio nos cimentos carbonáticos e de re-

flectância de vitrinita. O tempo de residência da Formação Serraria, sob tais condições de profundidade e temperatura, estendeu-se por cerca de 117 M.a. (Barremiano).

A evolução diagenética durante este período corresponde, dentro do modelo proposto, à primeira fase diagenética das litologias da Formação Serraria (fig. 8). Esta fase caracterizou-se por um estágio eodiagenético desenvolvido sob condições de clima semi-árido, responsável pela formação de paleossolos do tipo caliche e silcretas, infiltração mecânica de argilas nos aluviões semiconsolidados, cimentação precoce através de crescimentos secundários de quartzo, K-feldspatos e, por fim, precipitação de cimento carbonático (romboedros zonados de dolomita e extensiva cimentação por mosaico de dolomita variando entre mais e menos ferrosa; foto 1). No decorrer da eodiagênese foram importantes os efeitos da compactação mecânica sobre os intraclastos argilosos, particularmente no intervalo de arenitos inferiores e nos níveis mais grossos e/ou conglomeráticos. A alteração de minerais detríticos ferro-magnesianos contendo

titânio foi responsável pela precipitação local de óxidos de ferro (hematita) e titânio (leucoxênio). As condições estabelecidas durante a precipitação dos carbonatos proporcionaram a corrosão de silicatos e alumínio-silicatos. Tais reações, sob condições eodiagenéticas, favorecem localmente a precipitação de caulinita.

O estágio mesodiagenético desta primeira fase da história diagenética da Formação Serraria nos setores de Caioba, Camorim, Atalaia-Sul e Aracaju, foi controlado pelas condições de soterramento da unidade entre 130 e 117 M.a. e pelo acesso de fluidos provenientes dos geradores continentais localizados nos baixos adjacentes.

Os setores de Carmópolis e do poço UV-1 provavelmente devem ter sido saturados por hidrocarbonetos de natureza continental, posteriormente à fase de soerguimento pré-Muribeca.

O aspecto mesodiagenético mais importante verificado no domínio 1 foram as reações de dissolução e reprecipitação dos cimentos carbonáticos (fig. 8). Tais reações, vinculadas diretamente com a geração e destruição de porosidade, definiram o caminho para a entrada do óleo continental, bem como controlaram a percolação dos fluidos meteóricos nos arenitos durante a fase de soerguimento pré-Muribeca.

No Barremiano (final da fase *rift*, aproximadamente 115 e 117 M.a.), a Formação Serraria, no domínio 1, esteve localmente submetida a infiltração de águas meteóricas, decorrente do soerguimento, basculamento, e conseqüente exposição da unidade (fig. 9). Durante um intervalo de tempo que perdurou cerca de 74 M.a. foram mantidas profundidades entre 0 e 600 m na área de Caioba. A norte-nordeste do setor Carmópolis, a unidade foi soerguida provavelmente até profundidades em torno de 1 500 m.

As evidências petrográficas indicam que mesmo em situações de não exposição da formação à superfície de erosão, a entrada de água meteórica foi favorecida através de zonas de falhas aflorantes (fig. 11).

Como conseqüência direta da infiltração de água meteórica nas regiões aflorantes ou zonas de falha, registrou-se uma significativa ampliação da porosidade, promovida através da dissolução do cimento carbonático e dissolução/caulinização de feldspatos (foto 2).

A ação solvente dos fluidos meteóricos sobre o cimento carbonático (foto 3) mostra-se, quando comparada à ação sobre os feldspatos, menos efetiva com o aumento da distância em relação à zona de recarga. Isto pode ser observado particularmente nos setores de Caioba e Atalaia Sul-Aracaju. Nos poços amostrados ao longo da seção representada na figura 11, foi possível

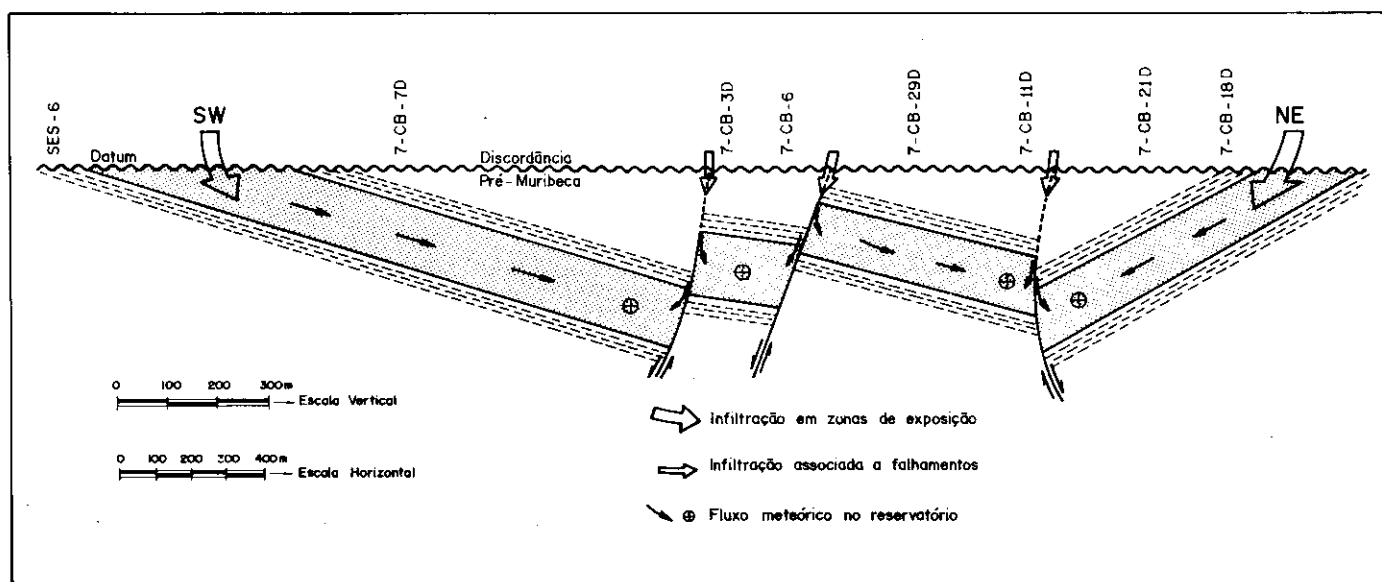


Fig. 11 - Seção estrutural esquemática do Campo de Caioba, com datum na discordância pré-Muribeca, mostrando os percursos principais de infiltração meteórica.
Fig. 11 - Schematic structural section through the Caioba oil field, with datum in the pre-Muribeca (pre-Aptian) unconformity, showing the main pathways of meteoric infiltration.

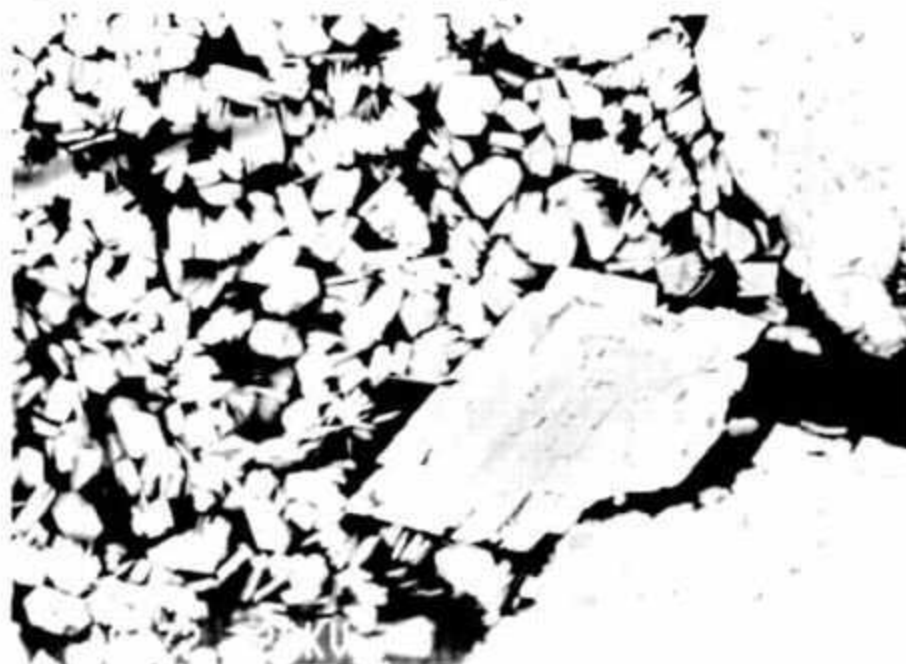


Foto 2 Dissolução de cristal zonado de dolomita ferrosa e precipitação de agregados de caulinita relacionadas ao influxo de águas meteóricas a 2 075,5 m no poço 7-CB-3-SES. Imagem BSE.
 Photo 2 Dissolution of zoned crystal of ferroan dolomite and flushing; 2,075.5 m in 7-CB-3-SES well. BSE image

vel verificar a presença de até 14% de cimento carbonático (poço CB-11D) acompanhado da total dissolução dos feldspatos e de bai-

xos valores de caulinita (5%). O material amostrado no poço CB-11D se localizava, à época da discordância, a aproximadamente

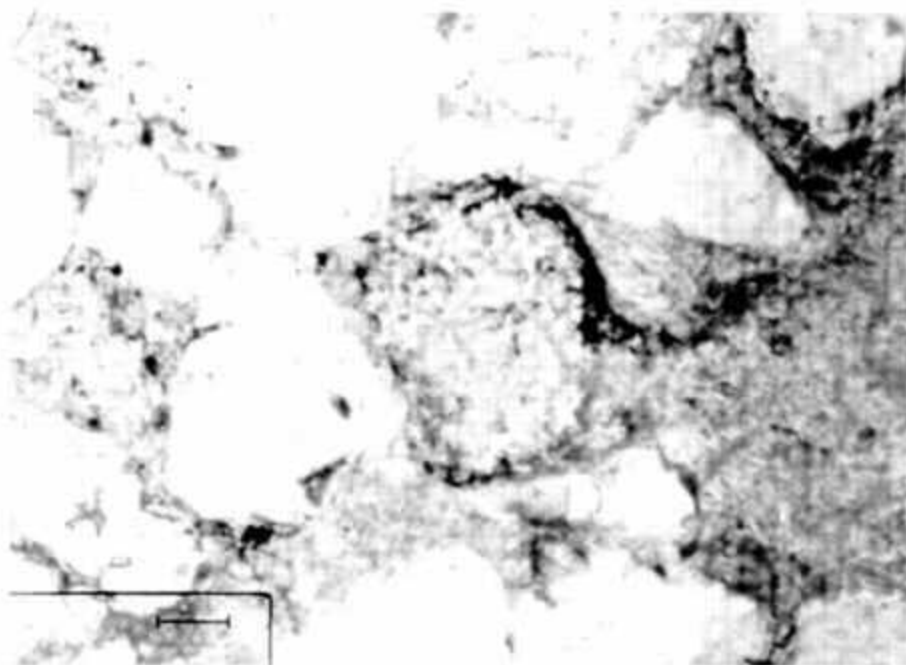


Foto 3 Forte dissolução e caulinitização de grãos de feldspato, característica dos reservatórios próximos às áreas de invasão de água meteórica. 7-CB-3-SES, 2 081,9 m. Luz plana; barra de escala = 100 μ m.
 Photo 3 Strong dissolution and kaolinitization of feldspar grains shown by the reservoirs close to the areas of meteoric invasion. 7-CB-3-SES well, 2,081.9 m. Plane polarized light, scale bar = 100 μ m

200 m de profundidade e a cerca de 650 m de distância da zona de recarga mais próxima.

Nos poços CB-3D e CB-6, mais próximos das zonas de recarga meteórica associadas a falhamentos (200 e 150 m, respectivamente), a cimentação carbonática é, em geral, ausente na porção mediana da formação, que é mais grossa e permeável. Valores elevados de cimento são, entretanto, registrados nas porções inferior e superior da formação, onde a percolação de fluidos foi mais limitada pela presença de intercalações de folhelhos e de níveis com intraclastos argilosos.

Nos intervalos mais grossos, os feldspatos foram quase que totalmente eliminados (1%). Em virtude da menor permeabilidade nos intervalos com grande incidência de intercalações pelíticas, o fluxo de água meteórica foi reduzido, não sendo capaz de remover os produtos da dissolução dos feldspatos, o que provocou uma maior precipitação de caulinita (até 17% no CB-3D e até 24% no CB-6; foto 4). O intervalo de arenitos finos basais no poço CB-3D contém menos caulinita (média de 2%) do que o intervalo de arenitos finos de topo, que inclui o Arenito Caioba, caracterizado no poço CB-6 (média de 9%).

Portanto, além da proximidade da zona de recarga meteórica, a permeabilidade e a continuidade dos corpos arenosos também exerceram importante papel no controle da percolação dos fluidos meteóricos pelos arenitos e na geração telodiagenética de porosidade nos reservatórios da Formação Serraria, do domínio 1.



Foto 4 - Agregados de caulinita ocupando a porosidade intergranular em arenito com compactação química e crescimentos secundários. Mica caulinizada. 7 CB 6D SES, 1 995,5 m. Imagem BSE.

Photo 4 - Kaolinite aggregates filling the intergranular porosity in an overgrowth cemented and chemically compacted sandstone. Kaolinized mica flake. 7 CB 6D SES well, 1,995.5 m. BSE image.

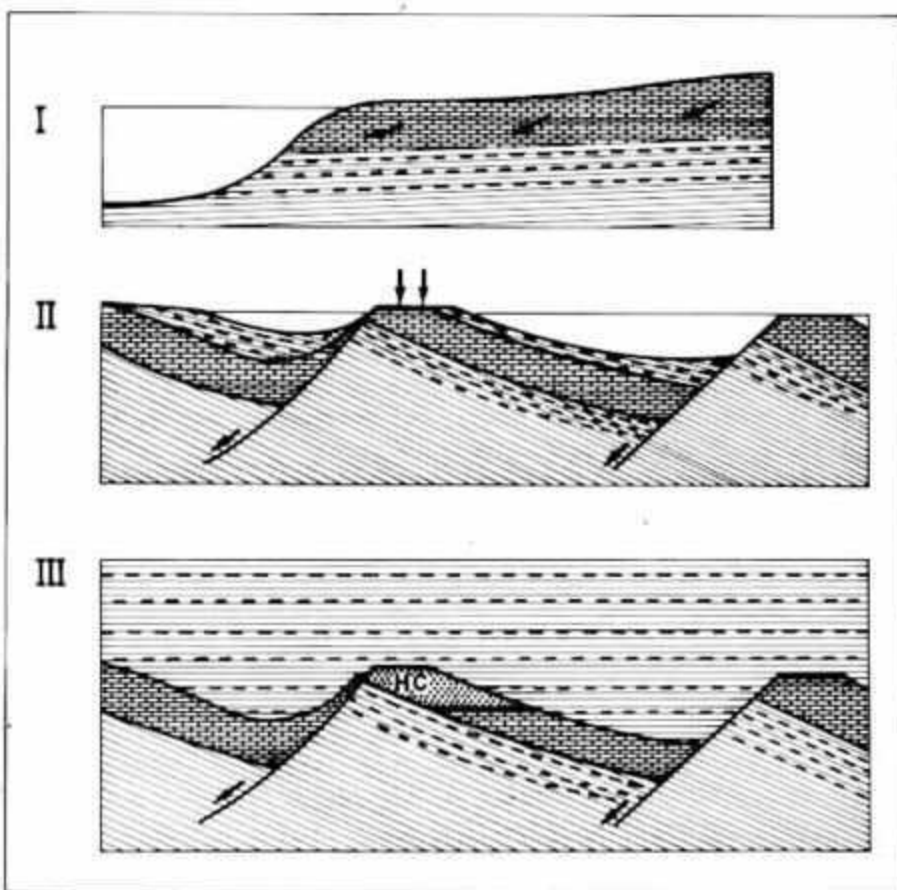


Fig. 12 - Seção geológica simplificada através de um reservatório do Mar do Norte do tipo blocos basculados: 1) Deposição progradacional de arenitos do Jurássico Médio, infiltração eogenética de água meteórica. 2) Falhamento, basculamento, soerguimento e erosão; infiltração de água meteórica ao longo das áreas expostas; 3) Migração de hidrocarbonetos, aprisionamento de fluidos meteóricos (segundo Bjørlykke *et al.* 1989).

Fig. 12 - Simplified cross section through a Jurassic North Sea reservoir of the tilted block type: 1) Progradational deposition of Middle Jurassic sandstones, early meteoric water flushing; 2) Faulting, tilting, uplift and erosion, meteoric water infiltration along exposed areas; 3) Migration of hydrocarbons, trapping of meteoric fluids (after Bjørlykke *et al.* 1989).

Três outros processos diagenéticos encontram-se relacionados à entrada de águas meteóricas (fig. 8): 1)- a degradação do óleo do gerador continental, que já se encontrava no reservatório; 2)- a oxidação de fases ferrosas anteriormente precipitadas (dolomita ferrosa e pirita); e 3)- a calcitização local do cimento dolomítico.

Este panorama diagenético assemelha-se bastante ao descrito em reservatórios do Mar do Norte, particularmente aqueles relacionados a blocos basculados e soerguidos (Bjørlykke *et al.* 1988 e 1989). Diversos campos de óleo da plataforma norueguesa exibem reservatórios flúvio-deltaicos do Jurássico Inferior que foram falhados, soerguidos, basculados e invadidos por água meteórica no Jurássico Superior / Cretáceo (fig. 12). O processo promoveu intensa dissolução de feldspatos, precipitação de caulinita e oxidação de fases ferrosas, tal como observado no Campo de Caioba e em outros pontos do domínio diagenético 1 da Formação Serraria.

A história diagenética da Formação Serraria no domínio 1 (fig. 8) prosseguiu, no Maestrichtiano (74 M.a.), com uma segunda fase de subsidência. Profundidades em torno de 1 500 m foram atingidas no setor de Caioba já no início do Paleoceno (65 M.a.). De 65 M.a. até hoje a subsidência se tornou menos intensa, de tal forma que profundidades máximas de apenas 2 000/2 500 m foram atingidas.

Nesta fase, um segundo estágio mesodiagenético se verificou nos arenitos da Formação Serraria do domínio 1. Temperaturas ligeiramente mais elevadas foram atingidas (65-100 °C nos setores de Caioba, Camorim, Atalaia Sul, Ara-

caju e Carmópolis e 100-130 °C no setor "UV"). Uma nova fase de cimentação carbonática foi registrada (dolomita ferrosa e ankerita). Após uma fraca produção de porosidade secundária, presumivelmente relacionada ao gerador Muribeca transicional, uma nova fase de crescimentos secundários de quartzo foi precipitada. O quartzo tardio foi o responsável pela obliteração final da porosidade nos reservatórios em grande profundidade, como observado no domínio 2.

Os processos diagenéticos registrados neste segundo estágio mesodiagenético sofreram o efeito, não só do segundo gerador (transicional), mas também do gerador continental, que continuam gerando nos baixos mais próximos aos setores de Carmópolis e "UV".

4.3 – Modelo Diagenético para o Domínio 2

Neste domínio, a história de soterramento da Formação Serraia foi essencialmente distinta da seguida pelo domínio 1, embora apresentasse pontos de semelhança, tais como uma provável ação meteórica telodiagenética. Em geral, a eodiagenese no domínio 2 não apresenta variação quando comparada com a do domínio 1 (fig. 10). Pequena diferença é observada apenas no que se refere à infiltração mecânica de argilas, mais intensa no domínio 2, seguramente em virtude da localização mais proximal deste domínio (Campo de Robalo) em relação ao domínio 1 (setores de Caioba, Camorim, Atalaia Sul e Aracaju; figs. 2 e 5). O tempo de duração dos processos eodiagenéticos, porém, foi bem mais curto no domínio 2 do que no 1. Em apenas aproximadamente 2 M.a. (entre 142

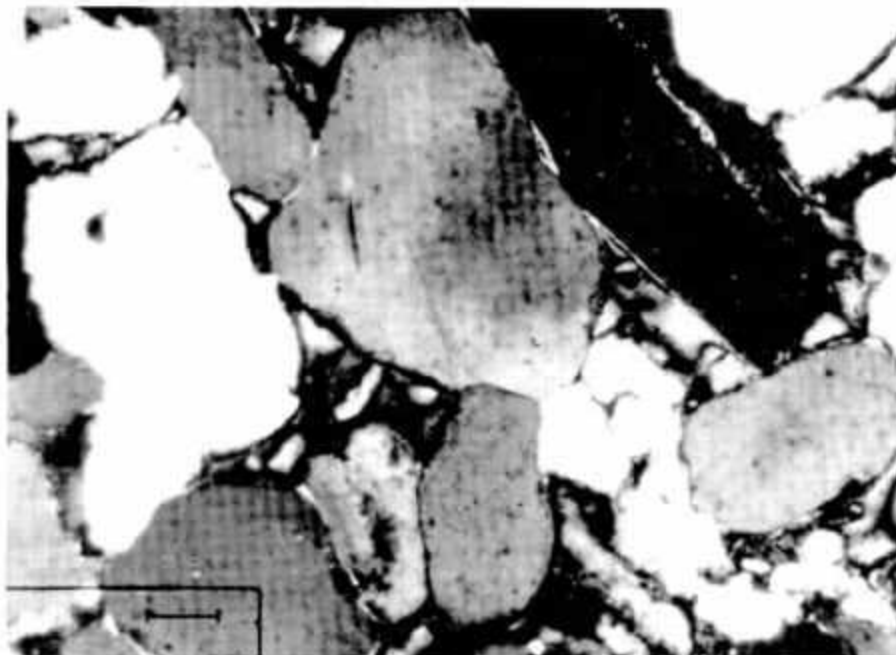


Foto 5 Reservatório Serraia profundo a 4 216,10 m no poço 6 RB 18 SES, mostrando porosidade primária reduzida essencialmente por compactação e finas cutículas de argilas mecanicamente infiltradas recobrimdo os grãos. Polarizadores cruzados; barra de escala – 50 µ.

Photo 5 Deep Serraia reservoir at 4,216.10 m in 6 RB 18 SES well, showing primary porosity reduced mostly by compaction, and thin coatings of mechanically infiltrated clays around the grains. Crossed nicols; scale bar = 50 µm

e 140 M.a.) a Formação Serraia atingiu profundidades de até 2 500 m. Entre 140 e 80 M.a., estes reservatórios se mantiveram entre 2 500 e 2 700 m de profundidade, sob condições de temperatura não superiores a 100 °C. Sob tais condições, desenvolveu-se, como no domínio 1, o primeiro estágio mesodiagenético. Neste estágio, parece ter ocorrido uma primeira fase de geração de hidrocarbonetos a partir dos folhelhos continentais, que promoveu a saturação parcial dos reservatórios (fig. 10).

Durante o soerguimento geral do final da fase *rift*, cerca de metade da seção sobreposta à Formação Serraia foi erodida. Apesar de não terem sido diretamente expostos na área de Robalo, os arenitos Serraia parecem ter sido atingidos por fluidos meteóricos, presumivelmente infiltrados através de falhamentos durante o desenvolvimento da discordância pré-Muribeca. Apesar da distância vertical do topo da unidade até a superfície de discordância em Robalo, a infiltração meteórica teria sido viabilizada pela presença de: falhamentos, bascu-

lamento, gradiente hidráulico proporcionado pelo relevo e pelas taxas de precipitação pluviométrica relativamente elevadas ao final do Barremiano (Franres, 1986). São evidências indiretas desta influência meteórica: a intensa destruição dos feldspatos, a dissolução quase completa dos carbonatos, a presença de restos cloritizados de caulinita e a ocorrência de óleo morto, gerado provavelmente pela degradação do óleo continental ao longo do contato óleo-água.

A despeito da intensa dissolução de feldspatos, o aspecto da porosidade intergranular nos reservatórios de Robalo é predominantemente primário (foto 5). A preservação da porosidade primária deu-se, aparentemente, pela combinação dos seguintes fatores: ação inibidora das cutículas de argila infiltrada sobre a cimentação por crescimentos secundários de quartzo e feldspato; e, pela ocupação precoce da parte superior do reservatório por hidrocarbonetos de origem continental, iniciada na Idade Jequiá, devido à rápida subsidência. Esta ocorrência confirma as observa-

ções efetuadas em outros reservatórios profundos, que apontam os processos de destruição da porosidade como normalmente mais lentos ou menos eficientes que os de geração de hidrocarbonetos. Dessa forma, a saturação precoce dos poros por hidrocarbonetos se apresenta como o processo mais eficiente de preservação da porosidade em reservatórios profundos (De Ros, 1990, neste volume).

As condições mesodiagenéticas no domínio 2 prosseguiram a 80 M.a., com a reativação da subsidência. Em aproximadamente 10 M.a. (70 M.a.) profundidades de aproximadamente 3 600 m haviam sido atingidas. O restante do espaço poroso da parte superior do reservatório foi saturado totalmente por hidrocarbonetos, permitindo a interrupção da diagênese e a preservação final da alta porosidade obser-

vada. A partir de então, a subsidência se deu de forma mais lenta, sendo atingidas profundidades de 4 000 m apenas a 20 M.a.

O mais importante processo de destruição da porosidade nesta segunda fase mesodiagenética foi a abundante cimentação por crescimentos secundários de quartzo (foto 6). O quartzo tardio foi o principal responsável pela obliteração final da porosidade em muitos reservatórios profundos.

Os elevados percentuais de porosidade encontrados nos reservatórios profundos Serraria do Campo de Robalo parecem estar ligados, portanto, à combinação do papel inibidor das cutículas de argila sobre crescimentos secundários, à rápida subsidência, à adição de fluidos solventes mesodiagenéticos e meteóricos e, principalmente, à

ocupação precoce por hidrocarbonetos, abortando a diagênese na parte alta da estrutura.

5 – POTENCIAL EXPLORATÓRIO DE RESERVATÓRIOS PROFUNDOS NA FORMAÇÃO SERRARIA E MODELOS DE OCORRÊNCIA

A análise dos aspectos de proveniência, das condições paleoambientais e deposicionais, da história de soterramento e da evolução diagenética da Formação Serraria permitiu reconhecer os fatores responsáveis pelas melhores porosidades exibidas pelos reservatórios dos campos de Caioba e Robalo. A possibilidade de que tais fatores se repitam em outras áreas, particularmente na porção imersa da bacia, é concreta e confere à Formação Serraria potencial de abrigar reservatórios profundos prospectáveis de maneira sistemática.

Com base nos casos estudados, dois modelos básicos de incremento e/ou preservação de porosidade podem ser reconhecidos. As condições de cada modelo podem ocorrer combinadas, com conseqüente somatório de sua eficiência.

5.1 – Modelo Caioba

O primeiro modelo de evolução de reservatórios profundos, informalmente denominado de Modelo Caioba, é similar ao proposto por Bjørlykke *et al.* (1988 e 1989) para alguns reservatórios jurássicos do Mar do Norte. O condicionamento básico do Modelo Caioba é de que, nos blocos mais elevados e basculados durante o tectonismo e

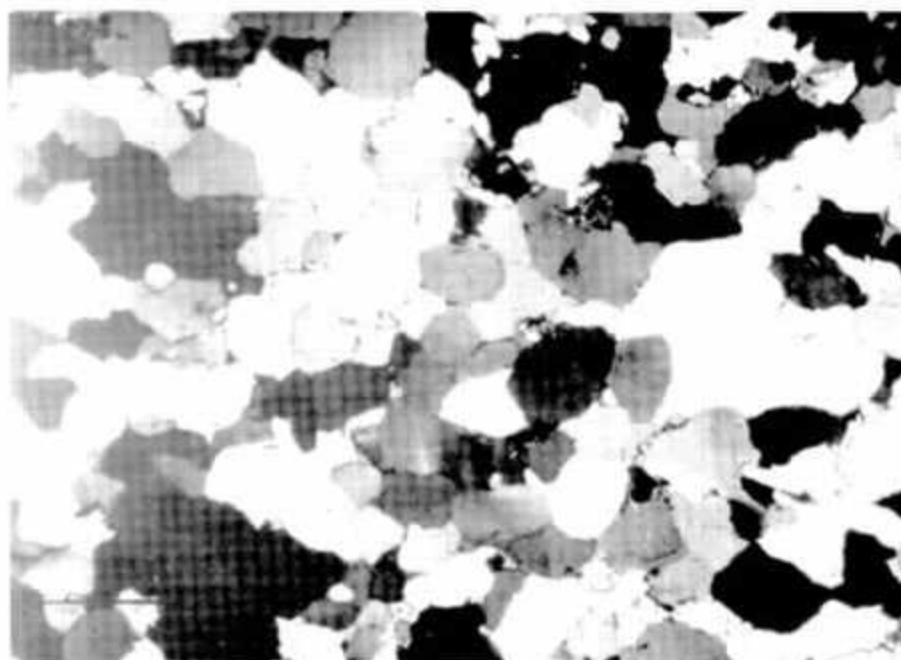


Foto 6 - Destruição total de porosidade por intensa cimentação por crescimento de quartzo. 6 RB-18-SES, 4 027,4 m. Polarizadores cruzados; barra de escala = 100 μ .
Photo 6 - Total destruction of porosity by intense cementation by quartz overgrowth. 6 RB-18-SES well, 4,027.4 m. Crossed nicols; scale bar = 50 μ m.

soerguimento geral ao final do estágio *rift*, a Formação Serraria foi submetida a um regime meteórico. A ação solvente da água meteórica, infiltrada a partir da superfície da discordância pré-Muribeca e/ou ao longo de zonas de falhas, propiciou considerável incremento da porosidade por dissolução de grãos de feldspato e cimentos carbonáticos. Essa porosidade ampliada possui excelente potencial de preservação na fase posterior de subsidência, particularmente nos blocos que permaneceram a profundidades rasas até o Terciário, sendo só então mais profundamente soterrados.

Um exame mais detalhado das áreas de subafloamento da Formação Serraria ao longo da discordância pré-Muribeca e das histórias de soterramento individuais dos blocos da parte oriental da bacia permitirão localizar setores onde ocorrem as condições básicas do Modelo Caioba.

5.2 – Modelo Robalo

O segundo modelo de desenvolvimento de reservatórios profundos na Formação Serraria que emerge deste estudo, denominado de Modelo Robalo, depende essencialmente da preservação de porosidade propiciada pela ocupação precoce dos reservatórios por hidrocarbonetos. Estas condições devem ter ocorrido basicamente nos blocos mais ocidentais, que sofreram acelerada subsidência durante o estágio *rift*, onde houve condições de geração, migração e saturação dos reservatórios antes da substancial redução de porosidade. A preservação pode ser auxiliada, como no caso de Robalo, por fatores de inibição da cimentação ou da compactação, como cutícu-

las de argila envolvendo os grãos (De Ros, 1990, neste volume). Pode, também, ser ampliada por processos de geração de porosidade secundária, como a infiltração de água meteórica (que parece ter igualmente ocorrido no Campo de Robalo; Garcia, em edição), ou solventes orgânicos provenientes dos folhelhos. O processo de preservação de porosidade pela ocupação precoce por hidrocarbonetos é extremamente eficiente, desde que o fechamento da estrutura e, portanto, a saturação, persista durante toda a história de soterramento posterior.

Os blocos profundos da faixa imersa mais oriental da bacia mostram bom potencial para a prospecção dos reservatórios Serraria do Modelo Robalo, desde que sua história de soterramento e sua evolução estrutural sejam convenientemente detalhadas. Mesmo reservatórios de gás a profundidades substancialmente maiores que as do Campo de Robalo podem ser previstos pela aplicação deste modelo.

O outro fator apontado por Bruhn *et al.* (1988) para o desenvolvimento de porosidade nos reservatórios Serraria dos campos ocidentais, qual seja, a associação com dois geradores de idades e posições estruturais diversas, parece igualmente muito importante para a prospecção de reservatórios profundos na unidade. Isto basicamente porque os reservatórios associados a geradores continentais (formações Barra de Itiúba e Coqueiro Seco) e transicionais (Formação Muribeca) possuem o potencial de receberem o óleo continental, gerado mais profundamente, logo após a ampliação de porosidade propiciada por solventes liberados dos folhelhos transicionais (De Ros, 1990, neste volume). Os reservatórios de

Caioba tiveram sua porosidade provavelmente incrementada por este processo durante sua segunda fase de soterramento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com base na Tese de Doutorado do autor principal, para a qual a cessão de dados e a colaboração de diversos técnicos da PETROBRÁS foram essenciais, dentre os quais Almiro Wilbert, Sylvia M.C. Anjos, Carlos A. Cordeiro, Cristiano L. Sombra, Antonio M.F. Figueiredo e Chang H. Kiang. Agradecimentos especiais ao Dr. Natálio Gammann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e ao Dr. Milton R. Franke, da PETROBRÁS, respectivamente, pela orientação da tese na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e pelo apoio e estímulo inicial para o empreendimento da mesma. Aos bolsistas de iniciação científica da UFRGS Karen Badarço, Atila A.S. da Rosa, Karin Goldberg e Ricardo F. Pinto, e à desenhista Josiane Mauricio Farias, por prestarem valioso auxílio em diversas fases da Tese de Doutorado de A.J.V. Garcia e deste trabalho. Aos revisores S.M.C. Anjos e C.R.O. Rodrigues, e ao revisor anônimo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEARD, D.C. WEIL, P.K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sands *AAPG Bulletin*, v.57, p.349-369. 1973.
- BJØRLYKKE, K., MO, A., PALM., E. Modelling of thermal convection in sedimentary basins and

- its relevance to diagenetic reactions. *Mar. Petrol. Geol.* n.5, p.338-351. 1988.
- BJØRLYKKE, K., RAM, M., SAIGAL, G.C. Sandstone diagenesis and porosity modification during basin evolution. *Geologische Rundschau*, v.78, n.1, p.243-268. 1989.
- BRUHN, C.H.L., CAINELLI, C., MATOS, R.M.D. Habitat do petróleo e fronteiras exploratórias nos rifts brasileiros. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.2, n.2/4, p.217-253. 1988.
- CATTO, A.J., FEIJÓ, F.J., AQUINO, G.S. Explorando uma bacia madura. In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA, 1, 1989, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS / DEPEX, 1989. p.391-397.
- DE ROS, L.F. Preservação e geração de porosidade em reservatórios clásticos profundos: Uma Revisão. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.4, n.4, p.387-404. 1990.
- DICKINSON, W.R., SUCZEK, C.A. Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bulletin*, v.63, n.12, p.2164-2182. 1979.
- FALKENHEIN, F.U.H. *et al.* *Análise da Bacia Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS / DEPEX/CENPES, [s.d.]. (Relatório interno, em edição).
- FIGUEIREDO, A.M.F. de. *Avaliação e perspectivas petrolíferas da Bacia Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1978. (Relatório interno).
- FRANKE, M.R., SILVA, V.J.L. *Projeto especial: fatores que condicionam a porosidade dos arenitos*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1975. (Relatório interno).
- FRANRES, L.A. Mesozoic - Cenozoic climatic history and causes of the glaciation. In: HSÜ, K.J. *Mesozoic and Cenozoic Oceans*. Boulder: Geological Society of America, 1986. (Geodynamics series).
- FUGITA, A.M. A Geomorfologia da superfície de discordância pré-apertiana na Bacia Sergipe e sua relação com os campos de óleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: [s.n.], 1974. v.1, p.121-135.
- GARCIA, A.J.V. *Sedimentação e diagênese dos arenitos da Formação Serraria, Jurássico Superior (?) - Cretáceo Inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas, NE do Brasil*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s.d.]. (Tese de doutorado, em edição).
- McBRIDE, E.F. A classification of common sandstones. *Jour. Sed. Petrology*, n.33, p.664-669, 1963.
- OLIVATTI, O., RIBEIRO, E.M. *Projeto Serraria*. Maceió: PETROBRÁS / RPNE / DIREX, 1969. (Relatório interno).
- PROJETO RADAM. BRASIL. *Levantamento de recursos naturais*. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1981. v.23. (Folha SB24/25, Jaguaribe/Natal).
- SILVA, V.J.L., DELLA FÁVERA, J.C. *Característica de reservatório e gênese da Formação Serraria*. Salvador: PETROBRÁS / RPBA / DIREX, 1972. 66p. (Relatório interno).
- SOMBRA, C.L. O papel da história de soterramento na evolução da porosidade de arenitos (bacias marginais brasileiras). *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.4, n.4, p.413-428. 1990.
- SOUZA, R.S. *Análise seqüencial dos testemunhos do poço 6-RB-18-SES: Bacia de Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987. 29p. (Comunicação técnica/DIGER, 83).

EXPANDED ABSTRACT

Since the beginning of oil exploration in Sergipe-Alagoas Basin, Northeastern Brazil, the fluvial sandstones of Lower Cretaceous Serraria Formation have been considered poor reservoirs. This evaluation is mostly due to their steep decrease in porosity with depth in the

onshore portion of the basin. In contrast, the Serraria sandstones of the offshore blocks show much better porosity in deeper levels. To clarify the reasons for this disparity, and to establish principles for prospecting for deep reservoirs in the Serraria Formation, the paleogeography,

provenance, sedimentary environment, diagenetic and burial histories of the unit have been analyzed.

The Serraria Formation was deposited by a fluvial braided system crossing a wide cratonic

sag from the north-northwest, before the Atlantic rift rupture. The unit was deposited under dry climatic conditions, and shows lower and upper finer intervals of interbedded sandstones and lacustrine shales, and a coarser middle interval of high energy deposits and horizons of a eolian reworking. The provenance analysis has revealed that a mature quartz-feldspathic detrital assemblage was deposited, as a result of continued weathering and transportation from distant source-areas of essentially plutonic composition.

The petrologic analysis of the sandstones allowed the definition of four diagenetic domains, two of which show potential for the occurrence of deep reservoirs. Diagenetic Domain 1, including offshore Caioba oilfield and adjacent onshore fields, shows an impressive porosity enhancement due to telogenetic meteoric water invasion. This occurred after the interruption of rift subsidence by general faulting, tilting and uplifting of blocks during the end of Neocomian and beginning of Barremian. Close to the pre-Aptian unconformity and to major faults, the meteoric

flushing has: dissolved most of the dolomitic cement and the feldspar grains; precipitated abundant authigenic kaolinite; oxidized pyrite and ferroan carbonates, and degraded part of the oil generated from the Neocomian shales. Since the Upper Cretaceous, the unit has been buried again to shallow depths (1,000 to 1,500 m), reaching 2,500 m in Caioba field only in the Tertiary. During this new burial, part of the abundant secondary porosity was reduced by ferroan dolomite and quartz cementation, and oil generated from transitional Aptian shales entered the reservoirs.

Diagenetic Domain 2 includes the Robalo oilfield, where Serraria reservoirs have shown porosities up to 18% at more than 4,200 m in depth. Their diagenetic evolution shows that the very rapid subsidence during the rift stage allowed the generation and migration of the Neocomian oil to the reservoirs before the severe reduction of porosity. Whereas the porosity in the oil-saturated zone was preserved, a massive quartz cementation has occluded nearly all the pores under the oil-water contact.

Prospecting models were based on these two occurrences. Deep reservoirs of the Caioba Model may be discovered following a detailed analysis of the subcropping areas and major border faults crossing Serraria Formation along the pre-Aptian unconformity, and of the burial histories of the eastern blocks of the basin. Deep reservoirs of the Robalo Model may be found in the easternmost offshore blocks that experienced very rapid subsidence during the rift stage, provided that the traps have kept their closure during the further burial history. The reservoirs associated with both source-rocks from the Neocomian and the Aptian also show good potential for porosity preservation, since they could have been saturated by Neocomian hydrocarbons soon after porosity generation by solvents produced from the Aptian shales.

Confirmation of the potential for deep reservoirs in the Serraria Formation has a great importance in the attempt to reverse the decrease in hydrocarbon production and exploratory success that the basin has experienced in the last decade.