

Estratigrafia de alta resolução 3D em depósitos deltaicos do início do rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas: impacto na compartimentação de reservatórios

3D high resolution stratigraphy of early rift deltaic deposits in the Sergipe-Alagoas Basin: impact on the reservoir compartmentalization

Cláudio Borba¹, Paulo Sérgio Gomes Paim², Antonio Jorge Vasconcellos Garcia³

resumo

Depósitos deltaicos da base da Formação Barra de Itiúba, início do estágio rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas, foram analisados sob a ótica da estratigrafia de alta resolução dirigida à caracterização de reservatórios. A base de dados utilizada consiste em testemunhos, amostras de calha e perfis elétricos do Campo de Furado, um campo maduro localizado na porção alagoana da bacia. Foram identificados os seguintes tratos de sistemas em uma sequência de 3ª ordem: trato de lago baixo, vinculado ao início de um pulso tectônico, composto por arenitos flúvio-deltaicos com grande continuidade lateral (melhores reservatórios do campo); trato transgressivo, produto da aceleração na taxa de subsidência mecânica, constituído por folhelhos (lago e prodelta) e arenitos finos (frente deltaica distal); e trato de lago alto, que indica períodos de calma tectônica, representado por

ciclos de progradação deltaica aos quais se vinculam reservatórios de qualidade inferior aos do trato de lago baixo. Na alta resolução, cada sequência de 4ª ordem comporta um ciclo transgressivo-regressivo de condicionamento climático, que constitui um reservatório independente, equivalente a uma zona reservatório. Esse arcabouço estratigráfico de alta resolução foi utilizado na elaboração do modelo geológico 3D, no qual a paleoestrutura, incluindo uma anticlinal de propagação de falha ativa à época da sedimentação, a arquitetura estratigráfica e a distribuição de fácies foram contempladas. O intervalo estudado é cortado por um grande número de falhas que compartimentam os reservatórios em diversas escalas e cujo impacto foi avaliado através da utilização de diagramas de justaposição e de razão de *gouge*.

Palavras-chave: Estratigrafia de alta resolução | Bacia de Sergipe-Alagoas | Formação Barra de Itiúba | Modelagem de reservatórios | Campo de Furado

¹ Petrobras. Unidade de Operações de Exploração e Produção de Sergipe e Alagoas. Engenharia de Produção. Caracterização e Estudos Especiais de Reservatórios. cborba@petrobras.com.br

² Universidade do Vale do Rio dos Sinos. ppaim@unisinos.br

³ Universidade Federal de Sergipe. garciageo@pq.cnpq.br

abstract

A high resolution stratigraphic study applied to reservoir characterization, based on well logs, cuts and cores from the Furado Field, a mature oilfield of the Alagoas Sub-basin, was carried out on deltaic strata of the lower portion of the Barra de Itiúba Formation (early rifting of the Sergipe-Alagoas Basin). Three lacustrine systems tracts were recognized within a 3rd order sequence: the lowstand systems tract (tectonic pulse initiation) that includes extensive, medium- to coarse-grained fluvial-deltaic sandstones that display good reservoir quality; the transgressive systems tract (tectonic climax), which comprises lacustrine and prodelta shale and distal delta front, fine- to very fine-grained sandstone; and the highstand system tract (tectonic quiescence) that encompasses several cycles of delta front progradation and related poor-quality reservoirs relative to those of the lowstand system tract. The 4th order sequences are represented by climate-driven transgressive-regressive cycles that constitute independent reservoirs, equivalent to a reservoir zones. This high resolution stratigraphic framework was then used on the building of the 3D geologic model, which honored the systems tracts geometry, and related facies, as well as the paleo-structure, including a syn-depositional fault propagation anticline. Several normal faults split the reservoirs at different scales. Their potential impact on reservoir fragmentation was approached through the use of fault juxtaposition and shale gouge ratio diagrams.

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

Keywords: *High resolution stratigraphic | Sergipe-Alagoas Basin | Barra de Itiúba Formation | Reservoir Models | Furado Field*

introdução

Estratigrafia de alta resolução e modelagem 3D são importantes ferramentas utilizadas no gerenciamento e revitalização de campos de petróleo maduros. Nessa linha, o presente trabalho apresenta um arcabouço estratigráfico tridimensional de alta resolução de uma sequência de terceira ordem, produto da sedimentação deltaica-lacustre em uma bacia rifte. A área estudada é o Campo de Furado, situado na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas (fig.

1). O intervalo estratigráfico (fig. 2) está inserido na base da Formação Barra de Itiúba, logo acima da discordância pré-Aratu, uma das mais importantes superfícies erosivas da bacia.

Para a realização do trabalho, foram utilizadas informações de 26 poços (amostras de calha, perfis, testemunhos, bioestratigrafia de ostracodes e dados de produção) e sísmica 3D (de baixa qualidade para caracterização de reservatórios, mas, importante para o entendimento do arcabouço estrutural).

As etapas necessárias para atingir os objetivos propostos foram: revisão de descrição de testemunhos, correlação rocha-perfil, identificação de superfícies com significado estratigráfico, correlação entre poços, confecção de seções e mapas estratigráficos (isópacas e isólitais), mapeamento estrutural das superfícies estratigráficas, estudo de ciclicidade, modelagem 3D, estimativa do impacto das falhas sobre a estratigrafia e estudo da relação entre a estratigrafia e os aspectos de produção dos reservatórios.

o campo de furado

Descoberto na década de 1960, o Campo de Furado se localiza na região de São Miguel dos Campos, a 50km sudoeste de Maceió (fig. 1). É um dos principais campos de petróleo de Alagoas, produtor em arenitos das formações Serraria, Feliz Deserto e Barra de Itiúba. Típico de sistemas deltaico-lacustres em bacias rifte, as acumulações apresentam forte compartimentação estratigráfica e estrutural, com centenas de reservatórios hidráulicamente independentes (Góes *et al.* 1986).

trabalhos anteriores

A estratigrafia da Bacia de Sergipe-Alagoas foi organizada por Schaller (1969) e revisada por Feijó (1994) e Campos Neto *et al.* (2007), que definiram a Formação Barra de Itiúba como depósitos constituídos por folhelhos cinza esverdeados e negros, intercalados com arenitos finos e calcários (fig. 2). Foram interpretados como deltaicos, enquanto seus equivalentes proximais, os arenitos grossos da Formação Penedo, seriam fluviais. Dentro da Formação

Barra de Itiúba, Galm e Santos (1994) reconheceram a discordância pré-Aratu (DPA), marcando um hiato de até 5 Ma em praticamente toda a bacia. Na última revisão da coluna, Campos Neto *et al.* (2007) resgataram a denominação Formação Feliz Deserto (originalmente definida pela Petrobras, em 1960) para os sedimentos abaixo da DPA (Sequência K10-K20, de idade Rio da Serra), desvinculando-os da Formação Barra de Itiúba (Sequência K34-K36, de idade Aratu a Jiquiá Inferior).

Durante a deposição dessas unidades, toda a área sul de Alagoas situava-se na porção proximal da margem flexural do rifte, cuja borda ativa provavelmente se encontra, atualmente, em águas profundas ou mesmo na África. Em estudo estratigráfico regional na área sul da Sub-bacia de Alagoas, Chiossi (1997) propôs um modelo de sedimentação, onde o empilhamento seria controlado por pulsos tectônicos na baixa frequência (3ª ordem) e por ciclos climáticos de frequência mais alta (4ª ordem). A tectônica seria determinante, principalmente nos tratos iniciais das sequências de 3ª ordem, compostos por depósitos regressivos originados pelo soerguimento relativo da rampa flexural. Já os tratos transgressivo e regressivo final seriam condicionados pelo clima. Em um trabalho recente (Borba, 2009), foi elaborado um arcabouço estratigráfico para as formações Feliz Deserto, Barra de Itiúba e Penedo, constituídas por um conjunto de sequências de 3ª ordem, uma delas aqui detalhada. O zoneamento do reservatório para fins de produção foi elaborado por Góes *et al.* (1986), no qual os reservatórios foram distribuídos em 17 zonas e subzonas nas formações Feliz Deserto e Barra de Itiúba. Esse zoneamento, baseado em folhelhos contínuos separadores de zonas, é utilizado no gerenciamento dos reservatórios do campo até hoje.

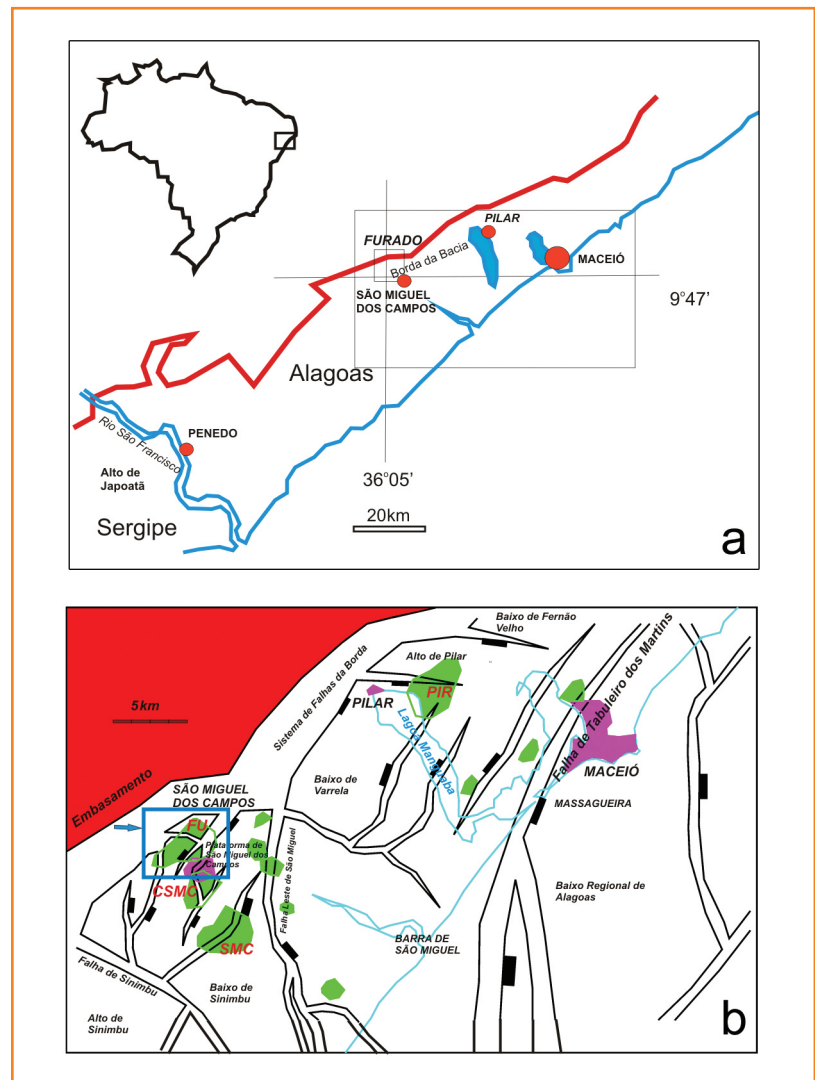


Figura 1 – a) Mapa de localização da área estudada, b) Mapa estrutural regional do embasamento. Em verde, os principais campos de petróleo.

Figure 1 – a) Location of the studied area. b) Regional structural map of the basement. In green, the major oilfields are shown.

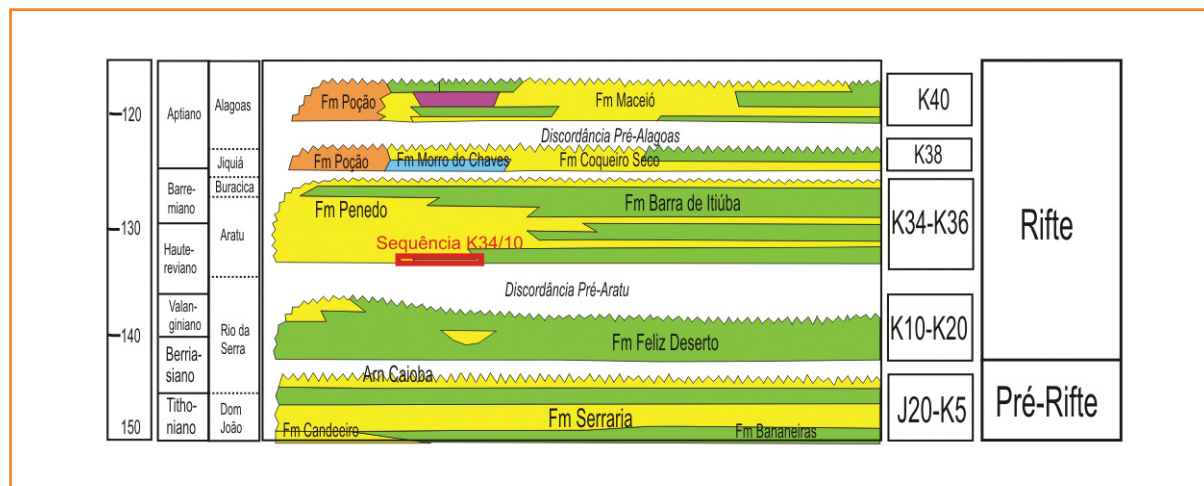


Figura 2
Carta estratigráfica da seção rifte da Sub-bacia de Alagoas (modificada de Campos Neto *et al.* 2007), com o posicionamento das unidades estudadas neste trabalho.

Figure 2
Stratigraphic chart of the Alagoas Sub-basin (modified after Campos Neto *et al.* 2007). The red area locates the studied stratigraphic units.

estrutura

O Campo de Furado está localizado na Plataforma de São Miguel dos Campos, uma feição estrutural formada por patamares separados por falhas paralelas à atual borda da bacia. As falhas produziram fechamentos onde se inserem as acumulações de petróleo dos campos de Furado, Cidade de São Miguel dos Campos e São Miguel dos Campos. O Campo de Furado, no degrau mais próximo da atual borda da bacia, é dividido em dois blocos principais: a Área Central, uma estrutura dômica associada ao *drag* reverso da falha de borda e a área de Fazenda Tomada, um *horst* intermediário entre a área central e o Campo de Cidade de São Miguel dos Campos (fig. 3). Toda a área é cortada por falhas conjugadas norte-nordeste. Quase a totalidade do deslocamento das falhas é de Idade Alagoas (Mesoaptiano/Eoalbio).

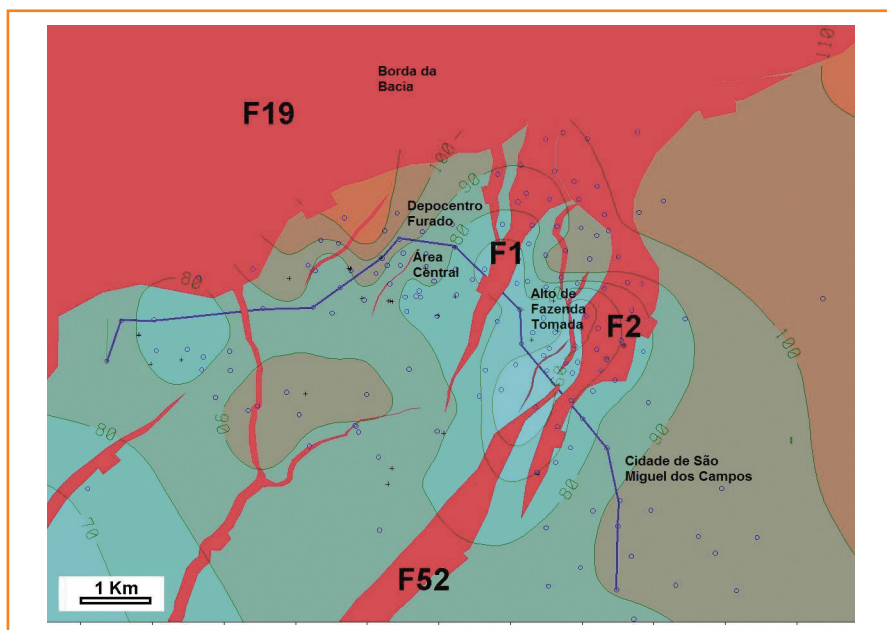
A Falha F19 (fig. 3) é a principal do sistema da borda, com pelo menos 3.000m de rejeito. Provavelmente, não se tratava de uma falha de borda ativa na época da deposição das seqüências K10-K20 e K34-K36, quando o limite da bacia se situava além desta região. As falhas F2 e F52 possuem rejeito de até 500m, e estão dispostas em padrão de revezamento, com mergulho aproximadamente paralelo à falha da borda (cerca de 35° para sudeste). A Falha F1 é conjugada às falhas acima citadas e delinea o Alto de Fazenda Tomada. O gráben limitado pelas falhas F19 e F1 é aqui chamado de Depocentro Furado, por ter sido uma área de maior espessamento de sedimentos, notadamente a partir do final do Andar Rio da Serra.

Figura 3

Mapa de isópacas (metros) da Sequência K34/10 superposto com mapa estrutural. Notar a coincidência entre a estrutura limitada pelas falhas F1 e F2 (Alto de Fazenda Tomada) e o afinamento da seqüência. F19, ao noroeste, é a falha de borda atual da bacia.

Figure 3

Isopach map (meters), superimposed on the structural map (K34/10 Sequence). Notice the coincidence between the structure bounded by F1 and F2 faults (Fazenda Tomada High) and the sequence thinning. F19, at northwest, is the current basin border fault.



seqüências de 3ª ordem

As seqüências de 2ª ordem K10-K20 e K34-K36 foram detalhadas em diversos intervalos de 3ª ordem, com duração individual entre 1 Ma e 3 Ma (Borba, 2009). O critério para definição dos limites foi, principalmente, o deslocamento abrupto de fácies, evidenciado pelos corpos amalgamados de arenitos fluvio-deltaicos com expressão regional, eventualmente com base erosiva em discordância angular. Superfícies de inundação máxima foram posicionadas em folhelhos contínuos, normalmente laminados, escuros e associados às anomalias de carbono orgânico total. O detalhamento da Sequência K34/10, na base da Formação Barra de Itiúba, é o conteúdo principal deste trabalho.

fácies e associações de fácies

Dois poços foram testemunhados no intervalo estudado (H e N), sendo o último de forma mais completa (cerca de 80m), previamente descrito por Cruz e Galm (1994) e Chioffi (1997) e aqui revisado. As associações de fácies e o padrão de empilhamento nos testemunhos permitiram a interpretação dos ambientes deposicionais (tabela 2), que não difere da apresentada pelos autores citados. Devido à limitada capacidade de discriminação através de perfis, as fácies definidas nos testemunhos (tabela 1 e fig. 4) foram agrupadas para fins de interpretação de poços não testemunhados, preenchimento das seções estratigráficas e do modelo 3D. Descrições de amostras de calha também foram utilizadas na interpretação litológica dos poços não testemunhados. Os depósitos finos (folhelhos e siltitos) foram agrupados na eletrofácies F, os arenitos muito finos a finos na eletrofácies AF e os arenitos médios a muito grossos na eletrofácies AG (tabela 1). Carbonatos foram considerados um agrupamento a parte (M), embora arenitos muito cimentados possam ser confundidos com carbonatos, tanto em amostras de calha como em perfis.

estratigrafia de alta resolução

O detalhamento da Sequência K34/10 no Poço N é apresentado na figura 5. Dentro da Formação Barra

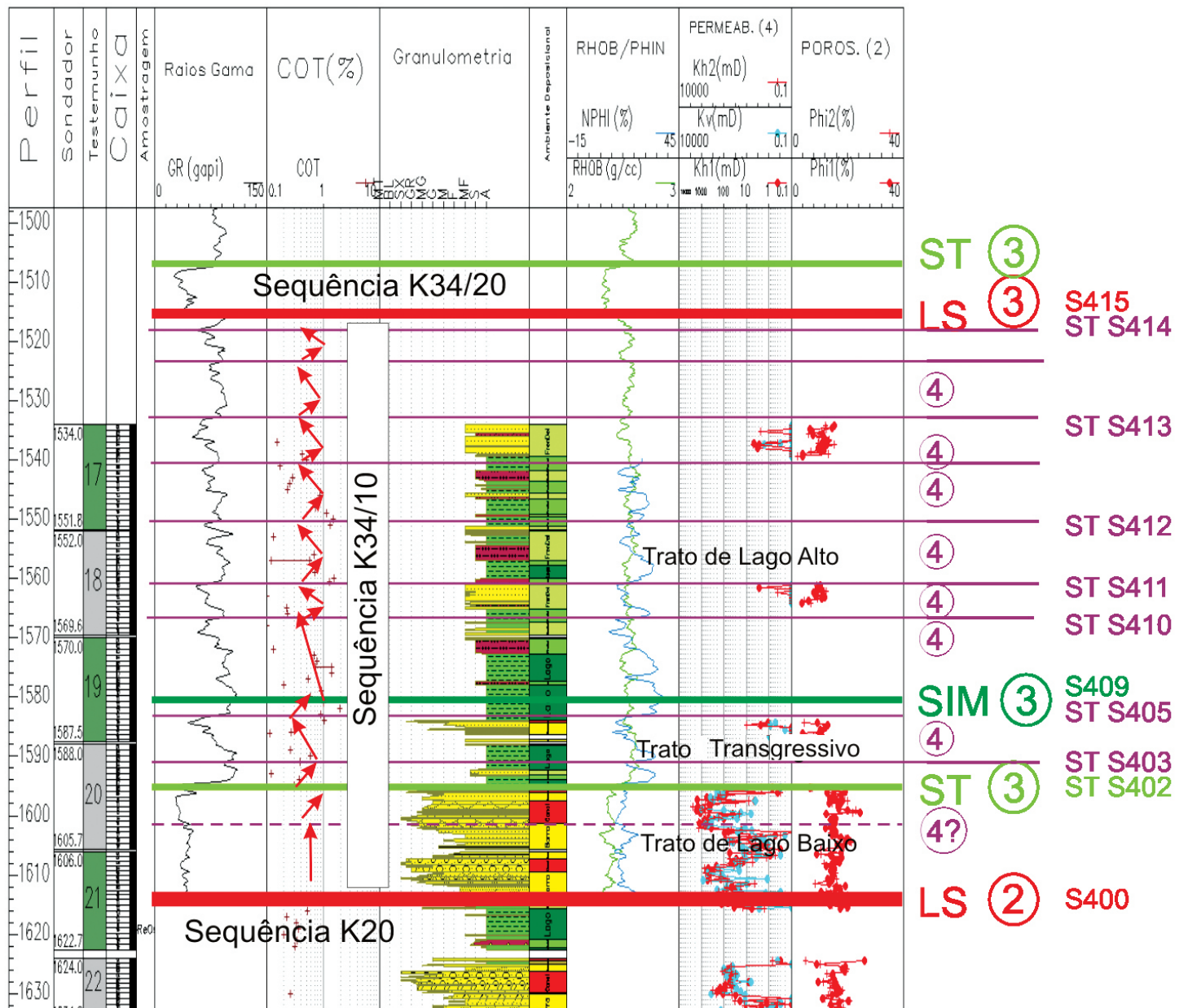


Figura 4 – Testemunho do poço N, com o posicionamento das principais superfícies estratigráficas da Sequência K34/10 (LS – limite de sequência, ST – superfície transgressiva, SIM – superfície de inundação máxima. Números com círculos indicam a hierarquia das superfícies).

Figure 4 – Well N core showing key stratigraphic surfaces of the K34/10 Sequence (LS – sequence boundary, ST – transgressive surface, SIM – maximum flooding surface). The circled numbers indicate surfaces hierarchy.

de Itiúba, este intervalo foi escolhido para o estudo de alta resolução pelos seguintes motivos: a) variabilidade de litofácies, que gerou um espectro de diferentes características quanto à qualidade, continuidade e volume poroso dos reservatórios, além de conter rochas geradoras e selos; b) contém reservatórios produtores de petróleo; c) encerra reservatórios, até o momento, considerados subcomerciais, mas que podem apresentar potencial de produção se explorados com técnicas adequadas (campanha de estimulações e poços com

múltiplos objetivos); d) posicionamento estratégico do intervalo na seção rifte: são os primeiros depósitos sobre a DPA, um limite de 2ª ordem com importante significado para o conhecimento da bacia; e) disponibilidade de testemunhos, o que não é a regra nos demais intervalos da Formação Barra de Itiúba.

A Sequência K34/10 apresenta espessura média de 90m e duração estimada entre 1 Ma e 1,5 Ma (subzona de ostracodes NRT-5.1 e parte da NRT-5.2, Andar Aratu Inferior). Este intervalo de tempo é muito incerto,

Tabela 1
Sumário das fácies da
Sequência K34/10.

Table 1
Facies summary (K34/10
Sequence).

Fácies em testemunho	Descrição	Agrupamento de Fácies resultantes da correlação rocha-perfil	Valor típico de raios gama (API)	Valor de densidade (g/cm ³)
ACxi	Arenito muito grosso a conglomerático, arcossiano a subarcossiano, cinza-esbranquiçado, subanguloso, com estratificação cruzada. Espessura métrica.	AG	40-45	2,36-2,40
AGxi	Arenito grosso, arcossiano a subarcossiano, cinza-esbranquiçado, subanguloso, com estratificação cruzada. Espessura métrica.			
AGbi	Arenito grosso a muito grosso, arcossiano a subarcossiano, com estratificação cruzada obliterada por abundantes traços fósseis (marcas de raízes e <i>Skolithos</i>).			
AMxi	Arenito médio, arcossiano a subarcossiano, com estratificação cruzada, gradando para o grosso no topo, lâminas de argila. Espessura decimétrica a métrica.			
AMma	Arenito médio, maciço.			
AGma	Arenito grosso a conglomerático, subanguloso, com grânulos de quartzo, feldspato e fragmentos de rocha, maciço. Espessura decimétrica.			
AFfd	Arenito muito fino, fluidizado e com estruturas em chama. Espessura decimétrica.	AF	60-70	2,45-2,50
AFma	Arenito muito fino, cinza, maciço. Espessura decimétrica a métrica.			
AFbi	Arenito muito fino, com bioturbação (<i>Planolites</i>)			
AFno	Arenito muito fino, cimentado, nódulos de calcita, com estrutura em chama. Espessura decimétrica.			
AFpp	Arenito muito fino, com estratificação plano-paralela.			
Afla	Arenito muito fino, com laminação plano-paralela, geralmente deformada. Espessura decimétrica.			
Afra	Arenito muito fino, cimentado, com nódulos carbonáticos e marcas de raízes. Espessura decimétrica. Paleossolo.			
AFrp	Arenito muito fino com microestratificação cruzada cavalgante. Espessura decimétrica.			
AFhk	Arenito muito fino com laminação truncada por ondas. Espessura de até 30cm.			
AFsl	Arenito fino, com lâminas de pelitos e feições de escorregamento.			
Sv	Siltito esverdeado, com estruturas em chama e fluidização. Espessura métrica de até 5m.			
Fv	Folhelho cinza-esverdeado, siltico, pouco laminados, deformados e bioturbados. Espessura métrica de até 3m.			
Fn	Folhelho escuro, muito físsil, com slickensides, filmes e fraturas preenchidas por calcita. Espessura métrica.			
M	Calculutito castanho escuro, espessura centimétrica	M	70	2,62

devido à limitada resolução bioestratigráfica. Foram assinaladas algumas superfícies de fácil rastreamento, com significado estratigráfico (figs. 4 e 5): a S400, uma superfície que delinea o limite de sequência de

2ª ordem, equivalente a DPA; a S402, uma superfície transgressiva de 3ª ordem; as S403 a S405, equivalentes a superfícies transgressivas de 4ª ordem do trato transgressivo de 3ª ordem; a S409, uma superfície

Ambiente	Associação de fácies	Fácies dominantes	Eletroformas
Planície Deltaica	Canal distributário.	ACxi, AGxi, AGbi	Sino ou caixote quando amalgamados. Espessura de até 5m.
	Baía interdistributários	Não amostrada	
Frente deltaica	Arenito grosso, arcossiano a subarcossiano, cinza-esbranquiçado, subanguloso, com estratificação cruzada. Espessura métrica.	AMxi, AGxi, AGma, AFma, AFfd	Sino invertido nos perfis GR, com espessuras de 3m a 10m. A amalgamação com os canais distributários pode resultar em caixotes com até 30m de espessura.
	Barra distal	AFma, Afla, AFRp, AFfd, AFhk	Valores elevados de raios gama na base das feições em sino invertido. Passagem transicional para barra de desembocadura.
Prodelta	Prodelta	Fv. Sv	GR elevado. Passagem transicional para barra distal.
Lago	Lago	Fn, M	GR elevado, alta resistividade e tempo de trânsito no perfil sônico.
	Turbidito	AFma	Padrão de GR serrilhado, espessura máxima de 2m, isolados em meio aos folhelhos lacustres.

Tabela 2
Sumário das associações de fácies da Sequência K34/10.

Table 2
Summary of the facies associations (K34/10 Sequence).

de inundação máxima de 3ª ordem; as S410 a S414, superfícies transgressivas de 4ª ordem e a S415, um limite de sequência de 3ª ordem e base da sequência seguinte (K34/20). As superfícies de 3ª ordem delimitam os tratos de lago baixo, transgressivo e lago alto, equivalentes aos tratos regressivo inicial, transgressivo e regressivo final de Chiassi (1997), respectivamente.

Os limites de sequência de 4ª ordem foram tentativamente marcados na base dos ciclos de progradação deltaica. Devido à ausência de discordâncias subaéreas em função da subsidência contínua, os limites de sequência

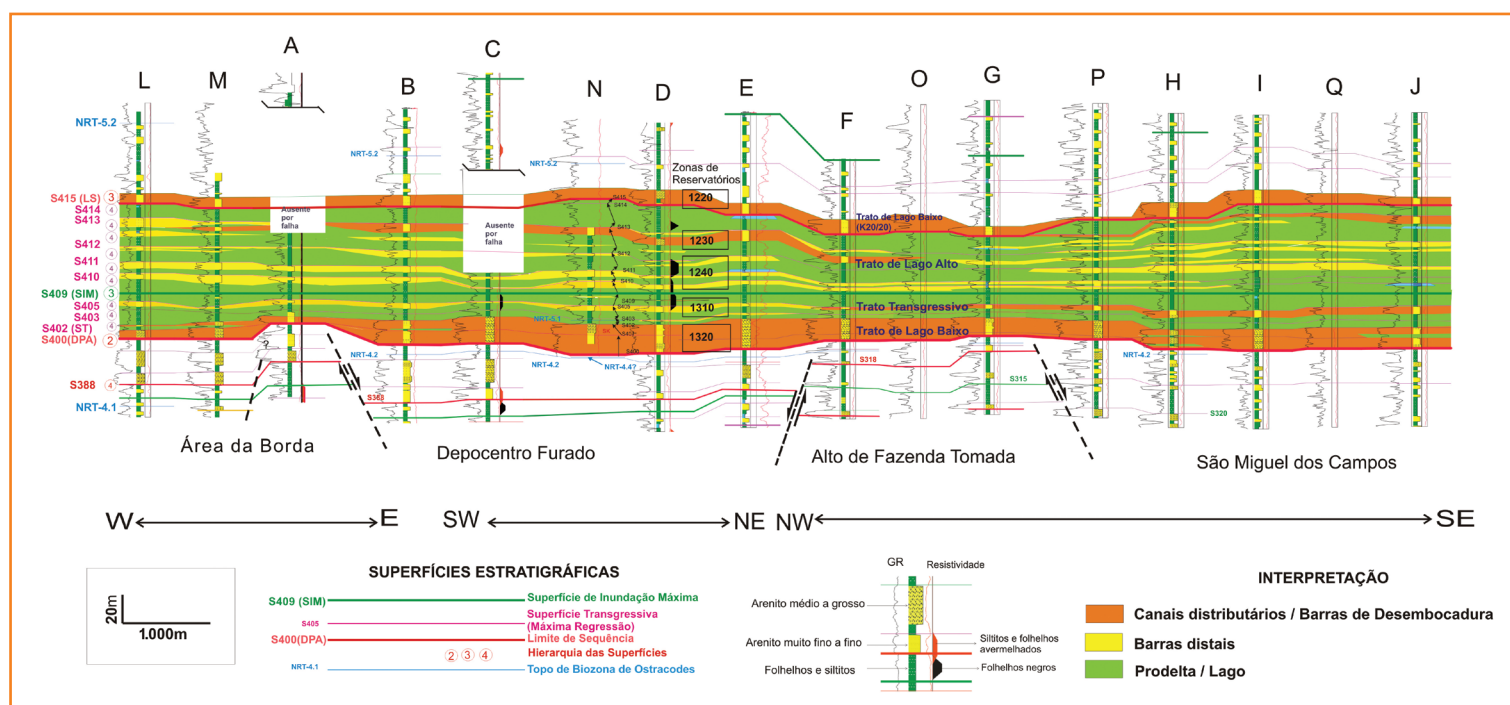
são “concordâncias correlativas”, sendo impossível determinar o seu posicionamento exato. Por isso, na alta frequência, os ciclos transgressivo-regressivos, limitados por superfícies transgressivas ou de regressão máxima (*sensu* Catuneanu, 2006), foram mais bem aplicados.

trato de lago baixo

O Trato de Lago Baixo ocorre como conjuntos de camadas de grande continuidade, constituídos,

Figura 5
Seção estratigráfica da Sequência K34/10.

Figure 5
Stratigraphic section of the K34/10 Sequence.



principalmente, por lentes de arenito amalgamadas (figs. 4 e 5). Trata-se de um intervalo de cerca de 20m de espessura, geralmente com padrão em caixa nos perfis raios gama (fig. 4), interpretados como depósitos de canal distributário e barra de desembocadura proximal. Apresenta dois ciclos rastreados por todo o campo, o que permite considerá-los alogênicos (sequências de 4ª ordem). Evidências de ambiente subaéreo são sugeridas pela presença de rizoturbações e de escavações de insetos no topo das barras. Em direção às áreas distais, ao sul, ou próximo ao Depocentro Furado, gradam para fácies mais finas (barras distais), até praticamente desaparecerem as fácies arenosas (fig. 6a).

Os mapas regionais de isólitais de arenito grosso e de folhelhos (figs. 6a e 6b) indicam fonte noroeste, sugerindo predominância da drenagem lateral. A geometria e a dimensão do delta observadas nesses mapas são semelhantes aos deltas de *lowstand* de margem flexural descritos por Scholz (1995) no Lago Malawi, Rifte Africano, e em afloramentos de depósitos de riftes lacustres. Os mesmos mapas regionais também mostram contribuição axial, com fonte de nordeste. Nesta área proximal, na região de Maceió, ocorrem arenitos eólicos (Pinho e Costa, 1990).

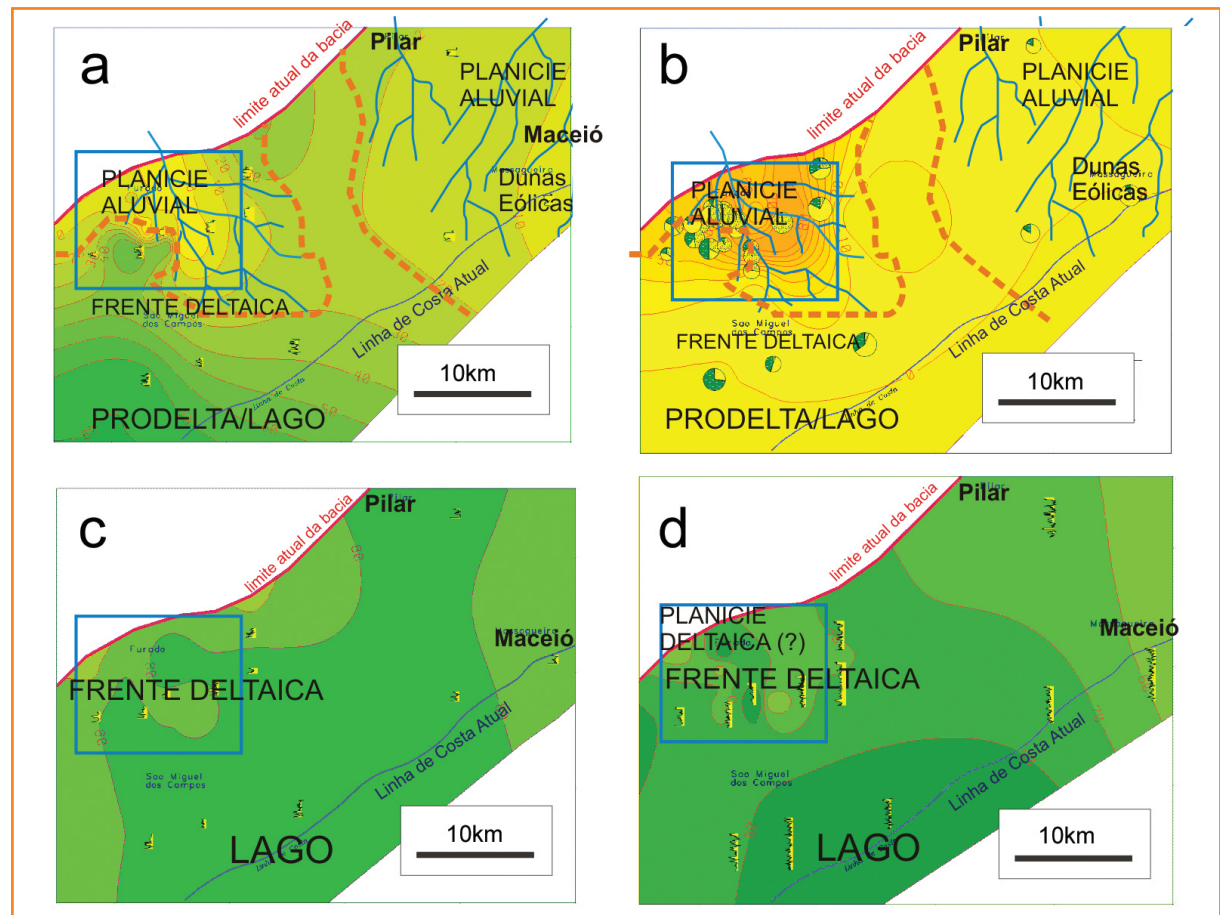
A DPA se expressa como o contato brusco e angular dos depósitos finos de prodelta/barra distal da sequência subjacente (K20), com os depósitos descritos acima. Em algumas áreas, onde também estão presentes os arenitos grossos na Sequência K20, não existe o contraste litológico. Neste caso, o posicionamento do limite de sequência é marcado na base do corpo contínuo, tabular, que trunca a sequência anterior, observado em seções estratigráficas (fig. 5). Em um testemunho que atravessou a discordância (Poço H), uma camada de paleossolo, composta por arenitos cimentados por calcita precoce, separa esses dois conjuntos. O truncamento angular da discordância é claramente percebido em seções estratigráficas comprimidas, com ângulo médio de 2°, mas, dificilmente pode ser observado nos perfis corridos nos poços, que medem mergulhos de camadas. A chegada de depósitos fluvio-deltaicos sobre uma superfície previamente exposta sugere início da subida do nível do lago, marcando a passagem da acomodação negativa para acomodação positiva, porém, ainda baixa em relação ao aporte. Nos modelos de preenchimento de rifte, enquadra-se na definição de um trato de início de rifte de um pulso de 3ª ordem (*sensu* Prosser, 1993).

Figura 6

Mapa regional de isólitais (%) da Sequência K34/10. a) Trato de lago baixo, isólitais de folhelho (%), b) Trato de lago baixo, isólitais de arenito médio/grosso (%), c) Trato transgressivo, isólitais de folhelho (%), d) Trato de lago alto, isólitais de folhelho (%).

Figure 6

Regional isolith maps of the K34/10 Sequence. a) Shale isolith of the lowstand systems tract (%), b) Medium- to coarse-grained sandstone isolith of the lowstand systems tract (%), c) Shale isolith (%) of the transgressive systems tract, d) shale isolith (%) of the highstand systems tract.



trato transgressivo

O trato transgressivo é iniciado por um afogamento brusco e generalizado (superfície S402, fig. 4), com ocorrência de folhelhos negros. Apresenta dois ciclos de raseamento limitados pelas superfícies transgressivas S403 e S405. Esses ciclos possuem espessura de até 10m, sendo 1m a 5m do topo constituídos por arenitos muito finos de barra distal. O mapa regional de isólitais de folhelhos (fig. 6c) mostra a retrogradação em relação ao trato de lago baixo.

A superfície de inundação máxima (S409) é marcada dentro de uma camada contínua de 15m de espessura de folhelhos escuros, radioativos e muito físseis, com valores baixos de densidade, sem bioturbação, característicos de depósitos de lago mais profundo. As anomalias de carbono orgânico total, embora pequenas, são as maiores desde o início do rifte.

O trato transgressivo marca o início de um período de maior acomodação em relação ao aporte sedimentar, provavelmente ligado ao clímax tectônico, que associado ao clima úmido da época, possibilitou o rápido preenchimento do espaço por água. Além dos depósitos de lago, ocorrem fácies distais de depósitos deltaicos (barras distais e turbiditos de frente deltaica).

trato de lago alto

É constituído por sete ciclos de 10-15m, com pelitos na base passando a arenitos muito finos a finos no topo, com 3m a 5m de espessura. Eventualmente, ocorrem corpos de arenitos mais espessos, resultado do avanço do delta para áreas mais distais. Os depósitos são interpretados como barras distais das frentes deltaicas. Barras de desembocadura proximais e raros canais distributários podem ocorrer próximo ao topo do trato de lago alto. Geralmente, há um retorno das progradações deltaicas (fig. 6d), embora, na área estudada, normalmente estejam representadas somente suas porções distais (barra distal e prodelta). É possível que o topo da sequência contenha depósitos de planície deltaica, não amostrados pelos testemunhos. Cada ciclo constitui uma sequência de 4ª ordem, com limites não erosivos, devido à posição distal na paleogeografia do lago.

O trato de lago alto é interpretado como resultado do aumento do aporte em relação à acomodação. Como a Sequência K34/10 compõe uma sucessão

inicial de uma sequência de 2ª ordem, com tendência regressiva típica de preenchimento de rifte, as construções deltaicas estavam parcialmente desenvolvidas. As planícies deltaicas situavam-se em áreas mais proximais, ao noroeste, além da atual falha de borda da bacia, e raramente avançavam até a área do Campo de Furado.

A sequência seguinte (K34/20) é iniciada com a brusca mudança de fácies (superfície S415), representada por um corpo extenso de arenitos finos a médios, com cerca de 10m de espessura, interpretados como barras de desembocadura e canais distributários associados. Em algumas áreas (fig. 5), nota-se um sutil truncamento angular, sugerindo tectonismo atuante (soerguimento relativo do Alto de Fazenda Tomada), embora, muito menos conspícuo do que o truncamento da DPA.

tectônica e sedimentação

Apesar de os depósitos do rifte na Sub-bacia de Alagoas se encontrarem afetados por um grande número de falhas de grande rejeito, quase toda a deformação observada é de idade Alagoas, já no final do estágio rifte. Durante a deposição das sequências K10, K20 e K34-K36, tende-se considerar que as falhas tiveram pouca atuação direta na sedimentação.

Ao analisar detalhadamente a arquitetura estratigráfica em conjunto com o arcabouço estrutural, percebe-se a influência do tectonismo na arquitetura estratigráfica, provavelmente ligado à iniciação das falhas em profundidade. No mapa de isópacas da Sequência K34/10 (fig. 3), observa-se um padrão norte-sul relacionado ao tectonismo de Idade Aratu e indicativo de tectonismo local atuante já nessa época. Este padrão é observado a partir da base da Sequência K20 (Rio da Serra Superior). Analisando a divergência dos estratos, tanto na baixa quanto na alta frequência, observa-se a existência de um paleoalto coincidente com o atual *Horst* de Fazenda Tomada, e um baixo localizado na área central do campo (Depocentro Furado, fig. 3). A Sequência K34/10 apresenta geometria levemente divergente em direção à bacia e ao Depocentro Furado, associada com truncamentos erosivos e *onlap* em direção às falhas (figs. 3 e 5). Esta geometria se ajusta ao mecanismo de dobras de crescimento (*fault propagation folds*), relacionadas à iniciação e

propagação de falhas em profundidade, típicas dos estágios iniciais de rifteamento (Gawthorpe *et al.*, 1997). Nessas estruturas, há o maior acúmulo de sedimentos no sinclinal e afinamento na anticlinal, inclusive, com a possibilidade de erosão associada à rotação produzida pelo crescimento da dobra. A inexistência de conglomerados associados a escarpas de falha e de variações bruscas de fácies reforça a idéia do mecanismo de dobras de crescimento condicionando a arquitetura estratigráfica.

Provavelmente, a atual falha de borda, atualmente com grande rejeito (>3.000m), também se encontrava em processo de iniciação. A figura 3 mostra espessamento junto à F19, mas, neste caso, é difícil precisar seu comportamento, já que os sedimentos no bloco soerguido foram removidos pela erosão devido ao soerguimento no Andar Alagoas.

Deste modo, o tectonismo atuante na sedimentação de seqüências de 3ª ordem como a K34/10 é evidenciado pela divergência dos estratos e pelo truncamento angular, ainda que sutil, na passagem para a Sequência K34/20 (superfície S415, fig. 5).

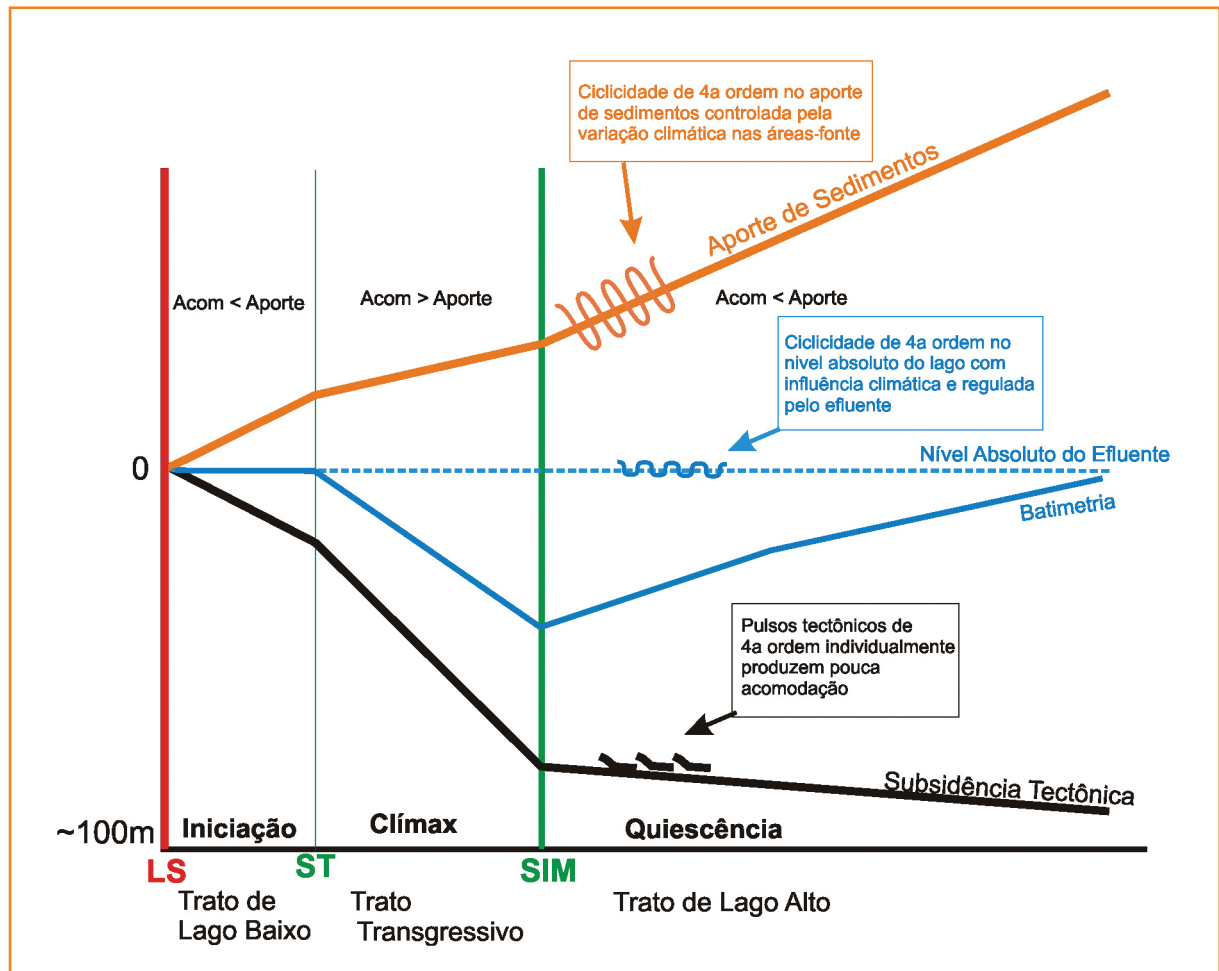
O controle do tectonismo sob os tratos de sistemas da seqüência de 3ª ordem assemelha-se com o modelo de Chiossi (1997), divergindo no fato de que aqui, considera-se que o trato transgressivo possua condicionamento tectônico e não puramente climático. Provavelmente, os tratos de lago baixo, transgressivo e lago alto estão associados, respectivamente, à iniciação, clímax e quiescência de um pulso de subsidência tectônica (fig. 7).

ciclicidade climática

Provavelmente, na hierarquia de 4ª ordem (dezenas a centenas de milhares de anos), os pulsos tectônicos individuais não seriam suficientes para gerar espaço de acomodação significativo, sendo os eventos climáticos condicionantes mais importantes na oscilação do nível do lago e do aporte de sedimentos. Variações climáticas têm sido apontadas como

Figura 7
Representação gráfica idealizada da evolução tectono-sedimentar de uma seqüência de 3ª ordem.

Figure 7
Idealized illustration of the tectonic and sedimentary evolution of a 3rd order sequence.



as principais condicionadoras da ciclicidade de alta frequência em riftes continentais (Olsen, 1986; Scholz e Rosendahl 1990; Chioffi, 1997; Santos, 2005). Na área estudada, devido ao lago ter sido predominantemente aberto e em razão do clima úmido (Chioffi 1997), as oscilações absolutas do nível do lago seriam, provavelmente, de baixa amplitude, sem resultar em grandes deslocamentos de fácies. Aparentemente, períodos mais úmidos resultaram na maior quantidade de areia trazida pelos rios.

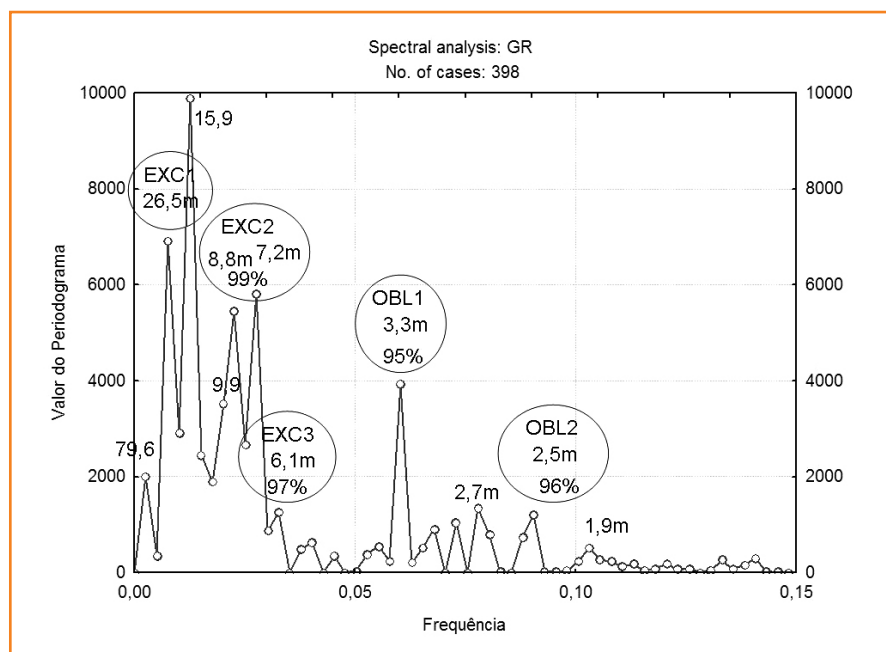
As alterações no clima podem produzir oscilações do nível do lago e no aporte clástico, resultado de variações na insolação e na pluviosidade nas áreas-fonte. Ao contrário dos pulsos tectônicos, mais observados nas hierarquias de 2ª/3ª ordens e que apresentam comportamento mais assimétrico, os ciclos climáticos apresentam características periódicas, atribuídas às influências de natureza astronômica. Esses ciclos foram reconhecidos por Milankovich (1941 *apud* Perlmutter e Matthews, 1989), com duração de 410ka (excentricidade longa), 126ka e 100ka (excentricidade curta), 54ka e 41ka (obliquidade), 23ka e 19ka (precessão), causando mudanças climáticas no planeta, mais ou menos intensas, dependendo da região climática afetada. O algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*), permite o rápido tratamento dos dados e a obtenção do espectro de frequência dos ciclos, caso existam. Análises de ciclicidade em riftes lacustres do Triássico da América do Norte foram realizadas por Olsen (1986), a partir de perfis de poços e curvas litológicas. No Brasil, foram realizadas por Santos (2005), em depósitos flúvio-deltaicos da Bacia do Recôncavo.

A Sequência K34/10, cujos tratos transgressivos e de lago alto se encontram numa condição paleogeográfica distal, sem evidências de erosão e com razoável controle bioestratigráfico, é um intervalo interessante para a investigação da ciclicidade climática de 4ª/5ª ordem. Utilizando-se a metodologia de Azambuja Filho e Perlmutter (2005), foi selecionado um intervalo do poço N (fig. 5), localizado no Depocentro Furado, área menos sujeita aos eventos erosivos. O intervalo compreende o trato transgressivo e de lago alto, excluindo-se o trato de lago baixo, dominado por depósitos proximais. O intervalo apresenta 79m de espessura, depositado em aproximadamente 1,2 Ma, o que fornece uma taxa de acumulação aproximada de 66 m/Ma (ou 128 m/Ma, se descompactados). É um valor relativamente baixo, se comparado às taxas muito elevadas nas fases mais avançadas do rifte. Aos valores de perfil raios gama, amostrados em intervalos de 0,2m,

foi aplicada a FFT, resultando no periodograma da série (fig. 8). Dividindo-se o intervalo de amostragem pela frequência dos ciclos, foram obtidos os períodos (espessuras de ciclos, supostamente proporcionais à duração). As relações entre os ciclos foram comparadas com as relações temporais do Cretáceo Inferior (Matriz de Milankovich, Berger *et al.*, 1992), associadas ou não aos ciclos climáticos. No periodograma, alguns ciclos ficam evidentes, e os assinalados são os que apresentam similaridade com a matriz. Provavelmente, os ciclos de 26,5m são associados às mudanças na excentricidade longa, com duração de 413ka (intervalo de 4ª ordem). Ciclos de 8,8m foram associados à excentricidade curta de 126ka. Um pico de 7,2m ocorre muito próximo ao de 8,8m. Ciclos próximos no espectro de frequência podem resultar de variações na taxa de acumulação, e um valor médio pode ser mais apropriado para a obtenção das relações entre ciclos. Neste caso, se for utilizada a média entre os picos de 7,2m e de 8,8m, a similaridade (comparação das razões entre as espessuras dos ciclos com as razões temporais esperadas) sobe de 91% para 99%. O intervalo analisado apresenta dez ciclos, similar aos ciclos de 4ª ordem caracterizados previamente. Totalizam um tempo de deposição de 1,26 Ma, próximo à estimativa de tempo da Sequência K34/10, baseada na bioestratigrafia. O ciclo de mais alta frequência bem correlacionado com os ciclos de Milankovich é o de 3,3m, ligado à alteração de obliquidade (49ka), hierarquizados em 5ª ordem.

Figura 8
Periodograma da curva de raios gama Sequência K34/10. Os círculos mostram a provável natureza da ciclicidade, a espessura dos ciclos e a similaridade com as razões de Milankovich.

Figure 8
Spectral analysis of the K34/10 Sequence. Circles show the cyclicity nature, average thickness of the cycles and degree of similarity to the Milankovich cycles ratio.



relação entre estratigrafia, zoneamento de produção e qualidade dos reservatórios

Zona é uma camada ou conjunto de camadas correlacionáveis, contendo fluido em fase contínua, desde que não existam descontinuidades de natureza estrutural ou diagenética. Quando estas ocorrem, a zona é dita compartimentada em zona-bloco ou zona de produção. Embora seja um conceito utilizado no gerenciamento de reservatório (com forte conotação administrativa), para a caracterização e gerenciamento de reservatórios é interessante que a zona tenha um bom suporte estratigráfico. No caso aqui estudado, as zonas reservatório apresentam *status* hierárquico de 4ª ordem, e geralmente coincidem com a parcela arenosa dos ciclos de raseamento.

A paleogeografia regional da área estudada, na forma de uma rampa suave, mesmo com a existência de suaves altos e depocentros produzidos pelo incipiente tectonismo, foi responsável pela formação das superfícies estratigráficas de grande continuidade (dezenas de quilômetros) e elevado potencial de correlação. Com isso, o zoneamento de produção do campo é facilitado, com correspondência entre as zonas e os ciclos estratigráficos (fig. 5). No zoneamento de Góes *et al.* (1986), o topo das zonas foi marcado nas superfícies transgressivas, na base de folhelhos contínuos. Isto explica o fato de cada zona reservatório se apresentar completamente isolada hidráulicamente. Eventualmente, as superfícies transgressivas (ou de máxima regressão, *sensu* Catuneanu, 2006) se encontram dentro do corpo de arenito, e muito próximo ao seu topo. Neste caso, para fins de mapeamento dos corpos, torna-se mais operacional o mapeamento do topo do arenito. Normalmente, os ciclos de 4ª ordem são caracterizados pela passagem gradual dos folhelhos de prodelta para os arenitos reservatório de frente deltaica. Desta forma, em relação à base, é melhor a não marcação da base do reservatório em um “folhelho separador”, como é feito, comumente, no processo de zoneamento. Assim, a base de uma zona ficaria no topo da zona subjacente e não no folhelho separador (fig. 4), com implicações no processo de modelagem de reservatórios para fins de cálculo volumétrico e simulação de fluxo. A exceção são as zonas com base brusca e erosiva, como ocorre no trato de lago baixo.

O trato de lago baixo corresponde à zona 1320, um tradicional reservatório do campo (tabela 3). A existência de uma superfície interpretada como limite de sequência de 4ª ordem dentro desse depósito e outras de menor hierarquia, de provável natureza autogênica (migração lateral das barras de desembocadura ou avulsão de canais distributários), produziram heterogeneidades internas no reservatório, porém, foram insuficientes para a formação de barreiras de permeabilidade significativas. Contudo, em situações dinâmicas, essas heterogeneidades devem ser levadas em consideração no detalhamento do reservatório para a implantação de projetos de recuperação avançada ou de restauração de poços.

No trato transgressivo, uma sequência de 4ª ordem corresponde à zona 1310. O ciclo limitado pela superfície transgressiva S403 não apresenta zona correspondente, por não possuir reservatórios produtores. No trato de lago alto, são registradas duas zonas (1230 e 1240) que correspondem aos ciclos delimitados pelas superfícies S412 e S414, respectivamente. As zonas reservatório incluídas no trato transgressivo e de lago alto apresentam qualidade significativamente inferior às do trato de lago baixo, principalmente devido à menor granulometria dos arenitos e elevada argilosidade. Também é costume, no gerenciamento de reservatórios, o agrupamento de vários ciclos que constituem reservatórios independentes numa única zona, quando, operacionalmente, é inviável o seu mapeamento individualizado. Um exemplo é a zona 1240, composta por três ciclos de 4ª ordem (tabela 3).

A superfície S415 é base do trato de lago baixo da sequência seguinte (K34/20), correspondente à zona 1220, outro tradicional reservatório do campo, embora de menor importância do que a zona 1320.

As diferentes características dos reservatórios da Sequência K34/10 estão resumidas na tabela 3. Assim como nas demais sequências de 3ª ordem da Formação Barra de Itiúba (descritas em Borba, 2009), na Sequência K34/10, os reservatórios de melhor qualidade em porosidade, permeabilidade, maior granulometria, espessura e consequente fator de recuperação mais elevado, são aqueles associados ao trato de lago baixo. Entretanto, em um campo de petróleo maduro, já com um grande número de poços perfurados, esses reservatórios de qualidade superior normalmente se encontram em elevado estágio de exploração. Assim, seu potencial se restringe às áreas periféricas ainda não perfuradas e à exploração em outras áreas da bacia. A grande continuidade lateral

desses reservatórios sempre requer trapas estruturais para a formação de acumulações.

Eventualmente, no trato de lago alto, barras de desembocaduras proximais podem se desenvolver localmente, gerando reservatórios de melhor qualidade, com até 5m de espessura efetiva, porém, lateralmente limitados. A pequena espessura e a elevada heterogeneidade desses reservatórios permitem que um poço drene uma área restrita. Embora não constituam reservatórios de boa qualidade, podem ser alvo de projetos de adensamento de malha e de estimulação por fraturamento hidráulico.

modelagem 3D

Uma vez que o objetivo foi testar como a estratigrafia de alta resolução pode ser incorporada à modelagem de reservatórios, foi construído o arcabouço estratigráfico tridimensional para as sequências K34/10 e K20. O principal objetivo de incluir a sequência sotoposta (K20) foi caracterizar geometricamente a DPA em uma área onde a mesma é obscurecida pela grande quantidade de falhas superimpostas.

Basicamente, a modelagem constou de duas etapas. Inicialmente, foi construído o gride a partir de superfícies estratigráficas. Em seguida, cada unidade limitada pelas superfícies foi preenchida com fácies, com o uso de técnicas geoestatísticas. Os detalhes da construção e seus resultados são descritos a seguir:

foram carregados 26 poços, juntamente com os marcadores estratigráficos previamente definidos; na coluna estratigráfica digital, foram informadas as relações estratigráficas entre as superfícies (concordante, erosional ou *onlap*); os poços tiveram suas profundidades originais alteradas, zeradas no *datum* (superfície S409, a inundação máxima da Sequência K34/10), já que, devido ao forte tectonismo p s-sedimenta o, as profundidades atuais se encontram muito díspares, deformando a arquitetura estratigráfica original; o gride estratigráfico foi limitado pelas superfícies S300 (base da Sequência K20) e S415 (topo da Sequência K34/10) e teve espaçamento de 100x100x1m, cobrindo uma área de 12x7,2km, num total de 3,9 milhões de células.

O número de fácies de um depósito pode ser grande, dependendo do grau de detalhes do int prete. Contudo, a discrimina o de fácies através de métodos indiretos, como combina o de perfis eletro-radioativos e de amostras de calha (os únicos dados disponíveis em todos os poços), não permite que um grande número de fácies seja estimado sem um erro significativo. Assim, optou-se pela simplifica o, com um menor número de fácies, mas que se aproximassem das associa es de fácies que representam os principais elementos arquiteturais que compõem os sistemas deltaicos e lacustres ora analisados. As interpreta es litológicas a partir de perfis, checadas com amostras de calha e testemunhos, foram transformadas em curvas e atribuídos os valores discretos para Calcilito=0, Pelito=1, Arenito Fino a Muito Fino=2 e Arenito médio a grosso=3. Foi realizada a análise do comportamento espacial das fácies com técnicas

Tabela 3

Rela o entre a estratigrafia de sequências, zonas de produ o e a qualidade de reservatórios da Sequência K34/10.

Table 3

Sequence stratigraphy, producing zones and reservoir quality relationships in the K34/10 Sequence.

Zona	Trato	Superfícies Limitantes	Fácies	Geometria	Elementos de arquitetura**	Espessura total e (porosa) (m)	Porosidade (%) plugue e (perfil)	Permeabilidade (mD)	Volume de óleo in Place	Produ�o acumulada	Fator de recupera�o
1200*	Lago Baixo	415-416	AF/AG	Tabular	BD/CD	16 (8)	15	12-123	ALTO	ALTO	ALTO
1230	Lago Alto	414-415	AF/F	Lenticular a Tabular	BDd/PD	4		-	BAIXO	ZERO	ZERO
		412-413	AF/AG	Tabular a lenticular	BDd	10 (1-5)	10 (7-14)	-			
1240		411-412	AF/F/AG	Lenticular	BDd	3-7 (1-2, 5)	10 (14-18)	0, 1-4	MÉDIO	ZERO	ZERO
		410-411	AF/F	Lenticular	BDd/PD	2	(14)	-			
		409-410	AF/F	Lenticular	BDd/PD	3-5		-			
1310	Transgressivo	405-409	AF/AG	Lenticular e Tabular	BDd/PD	1-5	(15)	0, 1-7	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO
		402-403	AF/F	Lenticular	BDd/PD	1-2		-			
1320	Lago Baixo	400-402	AF/AF	Tabular	BD/CD	15-25	17	10-500	ALTO	ALTO	ALTO

*Trato de Lago Baixo da Sequência K34/20

**BD - barra de desembocadura, BDd - barra distal, CD - canal distributário, PD - Prodelta

geoestatísticas convencionais, como a construção de curvas de proporção vertical e de variogramas.

A regionalização das fácies no gride foi condicionada aos dados dos poços (marcadores e curvas litológicas), aos parâmetros dos variogramas, às tendências (curva de proporção de fácies) e, principalmente, às unidades estratigráficas definidas no modelo de correlação/arcação estratigráfico (ciclos de 4ª ordem).

A curva de proporção vertical de fácies (CPV, fig. 9) é uma totalização da proporção média das fácies ao longo da estratigrafia. A proporção ao longo do gride é calculada a partir das curvas de fácies dos poços, sendo utilizada como tendência na distribuição das fácies como uma forma de considerar a não estacionariedade estatística da propriedade. Na figura 9, a DPA se destaca na forma da mudança abrupta de fácies.

Variogramas experimentais foram obtidos da análise espacial dos dados disponíveis (fig. 10). Contudo, devido à quantidade limitada de dados que representassem a variabilidade horizontal (pois os dados de poços são esparsos), preferiu-se a utilização de variogramas conceituais, impondo-se uma elevada razão de anisotropia horizontal/vertical, característica de sistemas deltaicos. Para o variograma conceitual horizontal, foi considerada de maior continuidade a direção deposicional N30W, baseada na geometria do delta obtida de mapas paleogeográficos regionais (fig. 6).

Para a simulação de fácies foi utilizado o algoritmo de Funções Aleatórias Gaussianas Truncadas, que permite a transição de fácies esperada para sistemas deltaicos. As simulações foram realizadas separadamente, por ciclos de 4ª ordem, para impor que as fácies fiquem subordinadas às unidades estratigráficas. Na figura 11, é apresentada uma “interpretação”

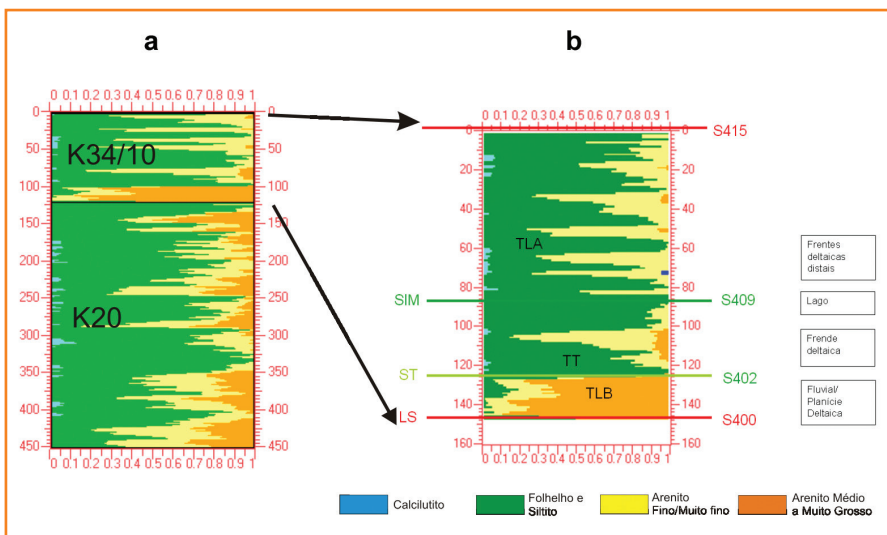
do volume simulado, onde elementos estratigráficos originalmente interpretados foram honrados, como a DPA e a dobra de crescimento do Alto de Fazenda Tomada.

Para a melhor visualização da geometria dos depósitos, a modelagem isolada da Sequência K34/10 foi realizada com maior refinamento, com redução da célula para 50x50x1m (total de 5,5 milhões de células). Como no experimento anterior, o gride estratigráfico foi construído de modo determinístico, respeitando os ciclos de 4ª ordem. No caso do trato de lago baixo, o variograma experimental vertical mostra claramente um padrão periódico (fig. 10), provavelmente resultante de dois ciclos de 4ª ordem no pacote tabular, que constitui um dos principais reservatórios do campo, fato anteriormente constatado no testemunho do poço N (fig. 5) e na CPV (fig. 9). Para a distribuição horizontal, foi utilizado o mesmo procedimento do experimento anterior, com a utilização de variogramas conceituais.

Os resultados são apresentados na figura 12, em seções verticais e horizontais representativas dos tratos de lago baixo, transgressivo e alto. O modelo representou a evolução paleogeográfica da Sequência K34/10, inclusive as direções de aporte de sedimentos, provenientes da margem flexural do rifte, ao noroeste.

Figura 9
Curva de proporção vertical de fácies das sequências K20 e K34/10.

Figure 9
Vertical proportion curve of the facies of the K20 and K34/10 sequences.



impacto das falhas na arquitetura estratigráfica

O tectonismo pós-deposicional é o principal formador de trapas de petróleo nas bacias rifte. A presença de falhas também amplifica a heterogeneidade dos reservatórios deltaicos, onde as zonas reservatório são compartimentadas em blocos estruturais denominados zona-bloco. No caso dos reservatórios delgados, como é o caso dos ciclos de 4ª ordem da Sequência K34/10, falhas de pequeno rejeito podem isolar o reservatório em compartimentos frequentemente não detectados, devido à limitação de resolução sísmica ou de correlação de poços. Isto contribui significativamente para o baixo fator de recuperação desses reservatórios, pois um poço passa a drenar uma área restrita.

Para analisar a sensibilidade dos depósitos à presença de falhas sub-resolução, foi utilizado o diagrama que integra a justaposição de camadas

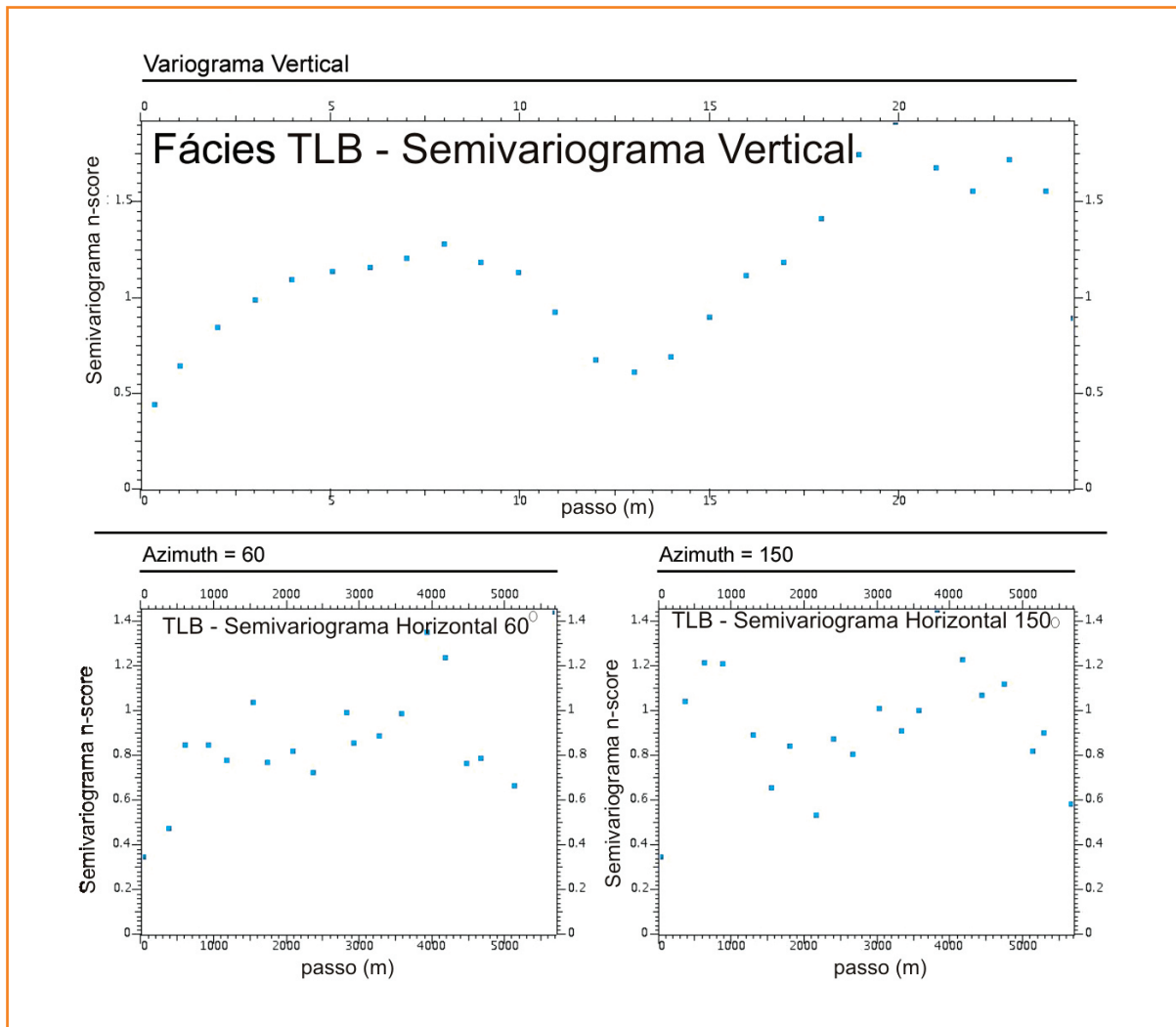


Figura 10
Semivariogramas experimentais das fácies do trato de lago baixo da Sequência K34/10.

Figure 10
Experimental variograms of the lowstand systems tract facies of the K34/10 Sequence.

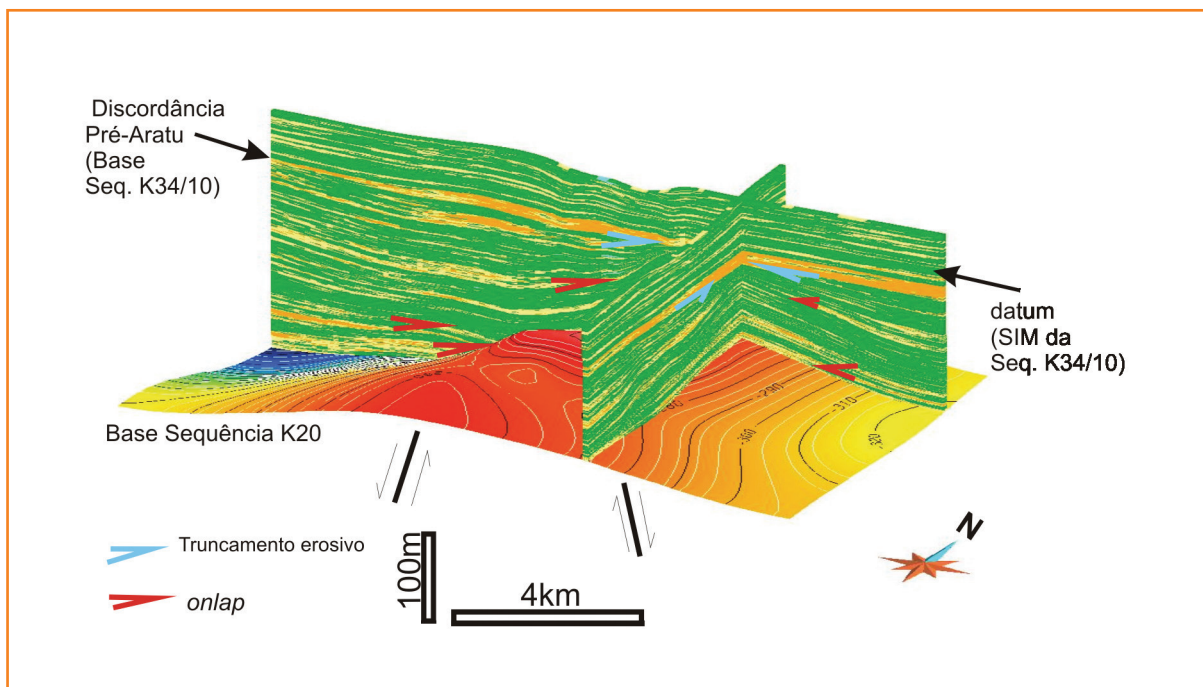


Figura 11
Modelo estratigráfico 3D das sequências K20 e K34/10.

Figure 11
3D model of the K20 and K34/10 sequences.

Figura 12
a) Visualização 3D da Sequência K34/10 e dos poços condicionantes; b) cortes horizontais nos tratos de sistemas da Sequência K34/10.

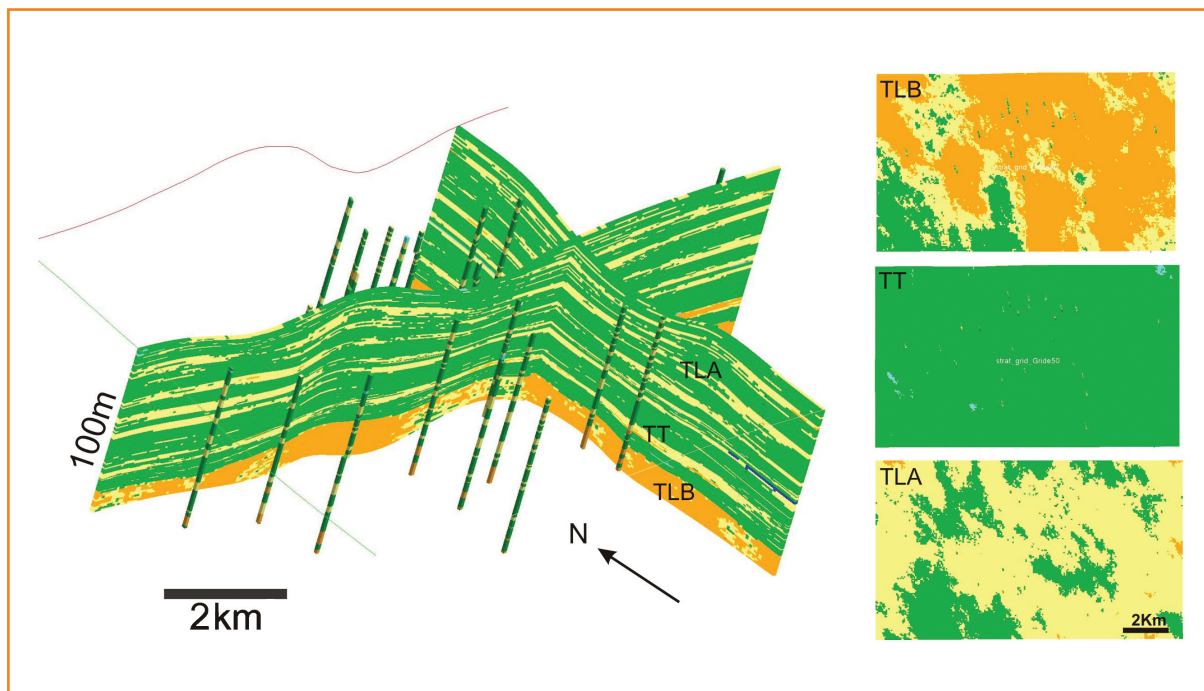


Figure 12
a) 3D view of the K34/10 Sequence and constraining wells; b) Horizon slices crossing the systems tracts of the K34/10 Sequence.

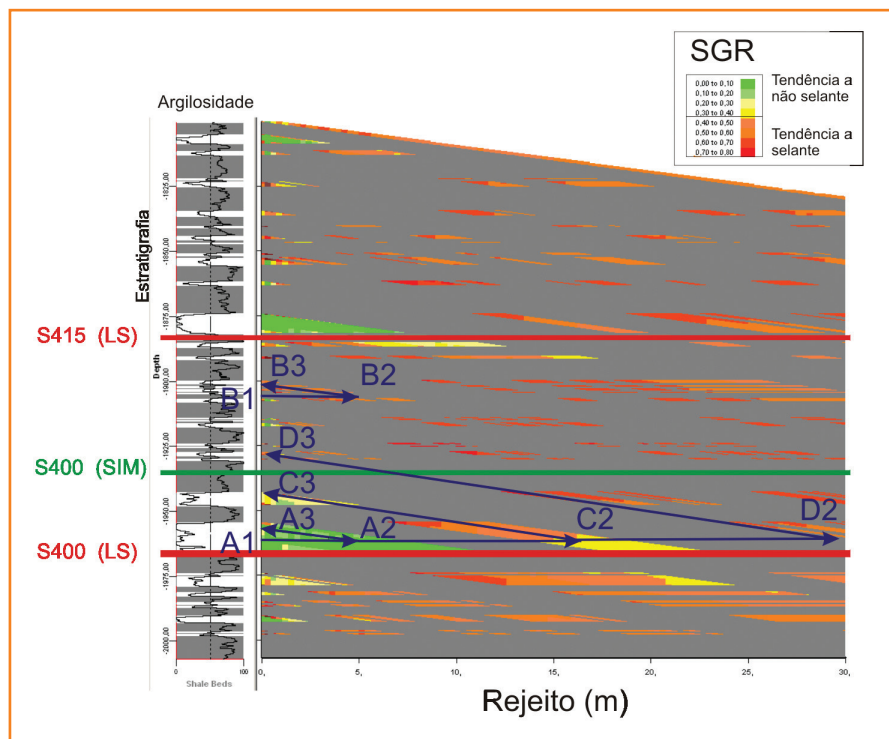
Figura 13
Diagrama de justaposição com estimativa de argilosidade (SGR) no plano de falha (SGR), mostrando as situações mais ou menos propícias à formação de barreiras de permeabilidade em zonas de falha.

com a estimativa da razão de *gouge* (*shale gouge ratio* - SGR, a argilosidade do plano de falha obtida a partir do teor de argila dos arenitos e das intercalações pelíticas).

Figure 13
Juxtaposition diagram estimating the gouge ratio at the fault planes (SGR) and showing the distinct potential of producing permeability barriers at the fault zones.

Para a Sequência K34/10, observa-se que falhas de pequeno rejeito (situação A, fig. 13) não são suficientes para isolar hidraulicamente o reservatório da zona 1320 (canais distributários e barras de desembocaduras

proximais do trato de lago baixo). No caso da situação A, um intervalo do reservatório afetado por uma falha de 5m de rejeito (seta A1-A2) é justaposto pela porção superior do mesmo reservatório (seta A2-A3), com SGR em torno de 0,1, calculado pelo algoritmo SGR, valor característico de falhas não selantes (Yielding *et al.*, 1997). Já uma falha de mesmo rejeito, afetando uma barra distal do trato de lago alto (situação B), apresenta SGR > 0,5, o que indica provável condição selante. Isto sugere que esses reservatórios mais delgados e argilosos sejam bem mais suscetíveis ao isolamento pelas falhas sub-resolução, e requerem maior adensamento de poços para sua exploração. Falhas de maior rejeito (15m, situação C) ainda podem ser insuficientes para formar selo nos depósitos espessos do trato de lago baixo. Neste caso, condições selantes são alcançadas no caso de falhas maiores que 25m (situação D), valor de rejeito no limiar da resolução dos métodos de detecção de falhas em subsuperfície. A justaposição arenito-pelito (representada em cinza no diagrama) é uma situação onde a falha é selante, desde que não ocorra abertura da falha por causas geomecânicas.



conclusão

Apesar de o intervalo analisado ser resultante de um dos pulsos iniciais do rifteamento da Bacia de

Sergipe-Alagoas, quando a taxa de subsidência era ainda moderada, verifica-se uma influência significativa do tectonismo na estratigrafia, evidenciada pelo padrão divergente das camadas, formação de altos e depocentros locais e truncamentos angulares. Esta geometria está ligada à ação de dobras de crescimento, relacionada à iniciação e propagação de falhas em profundidade, um mecanismo típico das fases iniciais do rifteamento. O tectonismo deve ter condicionado a arquitetura da sequência de 3ª ordem, sendo: o trato de lago baixo relacionado à iniciação de um pulso tectônico; o trato transgressivo, ao clímax e o trato de lago alto, ao seu arrefecimento. Na frequência mais alta (4ª ordem), as variações climáticas condicionaram a ciclicidade, sendo responsáveis, principalmente, por variações no aporte de sedimentos.

Existe correspondência entre as entidades da estratigrafia de sequências e o zoneamento de reservatórios. Em geral, uma zona coincide com um ciclo de raseamento, apresentando, para os depósitos aqui analisados, *status* hierárquico de 4ª ordem.

O trato de lago baixo, depositado sobre a Discordância Pré-Aratu, apresenta os melhores reservatórios do ponto de vista quantitativo (volume) e qualitativo (porosidade e permeabilidade), porém, já se encontram em avançado estágio de exploração. No entanto, podem ser alvo exploratório, sempre necessitando de traçamento estrutural. O trato transgressivo e o trato de lago alto são representados na área por arenitos muito finos de barra distal, com menor continuidade, volume e qualidade. Seu potencial de compartimentação é elevado, tanto do ponto de vista estratigráfico como estrutural, uma vez que mesmo falhas de pequeno rejeito podem produzir isolamento hidráulico. Como podem conter volumes de petróleo não avaliados ou não drenados, são candidatos a projetos de revitalização através de redução de malha e operações de estimulação de poços.

O arcabouço estratigráfico de alta resolução, juntamente com a interpretação e modelagem de fácies, permitiu a construção de um modelo estratigráfico 3D, onde as feições estratigráficas e estruturais sindeposicionais ficaram bem representadas. A utilização de estratigrafia de alta resolução amparada no conhecimento regional permite a construção de modelos tridimensionais de reservatórios mais realistas e, assim, a escolha da melhor estratégia de exploração.

agradecimentos

Agradecemos à Petrobras pela autorização para publicação e financiamento do programa de doutorado do autor Cláudio Borba. Aos colegas da Petrobras da UN-SEAL e ao suporte técnico dos programas da Landmark e Gocad, utilizados no desenvolvimento do trabalho.

referências bibliográficas

AZAMBUJA FILHO, N. C.; PERLMUTTER, M. A. Cicloestratigrafia: análise quantitativa de ciclos sedimentares, aplicações na seção sedimentar de idade Oligoceno-Mioceno da Bacia de Campos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, p. 13-26, 2005. (Edição temática especial: Ciclicidade na Sedimentação).

BERGER, A.; LOUTRE, M. F.; LASKAR. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for the paleoclimate studies. **Science**, v. 255, p. 560-566, Jan.1992.

BORBA, C. **Estratigrafia de alta resolução aplicada à modelagem de reservatórios do início do rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas**. 2009. 206 f. Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, 2009.

CAMPOS NETO, O. P.; SOUZA LIMA, W.; CRUZ, F. E. G. Bacia de Sergipe Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 405-415, maio/nov. 2007.

CATUNEANU, O. **Principles of Sequence Stratigraphy**. Elsevier, 2006. 375p.

CHIOSSI, D. S. N. **Estratigrafia de sequências e condicionamento tectono-climático num rifte continental (Bacia de Sergipe-Alagoas)**. 1997. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1997.

CRUZ, F. E. G.; GALM, P. C. Correlação das fácies sedimentares e formas de ostracodes não-marinhos dos andares Aratu e Eo-Buracica em sedimentos deltaicos da Formação Barra de Itiúba, Bacia de Sergipe-Alagoas. **Geociências**, v. 15, n. 1, p. 209-222, 1994.

- FEIJÓ, F. J. Bacias de Sergipe e Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 149-161, mar. 1994.
- GALM, P. C.; SANTOS, D. F. Caracterização de uma discordância de idade Pré-Aratu (Eocretáceo) na Bacia de Sergipe-Alagoas. **Acta Geológica Leopoldensia**, v. 39, n. 2, p. 555-562, 1994.
- GAWTHORPE, R. L.; SHARP, I.; UNDERHILL, J. R.; GUPTA, S. Linked sequence stratigraphic and structural evolutions of propagating normal faults. **Geology**, v. 6, n. 9, p. 795-798, 1997.
- GÓES, R. O.; MAGALHÃES, C. A. P.; ALVES FILHO, H. P. A.; GONÇALVES, J. R.; COSTA, M. N. C.; CORTES, M. H.; CAMPOS NETO, O. P. A.; VALVERDE, R. S.; FORMOSO, S. Mapeamento de detalhe dos campos de Furado, Cidade de São Miguel dos Campos e São Miguel dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., v. 4, 1986, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBG, 1986. p. 1701-1714.
- HAMSI Jr., G. P.; KARNER, G. Revisão de seções crustais da Sub-bacia de Sergipe através de modelagens tectonofísicas: implicações quanto aos padrões de preenchimento e quanto à evolução do fluxo térmico. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 10., 2005, Curitiba. **Resumo expandido...** Curitiba: SBG, 2005.
- OLSEN, P. E. A 40-million-year lake record of early Mesozoic orbital climatic forcing. **Science**, v. 234, p. 842-848, 1986.
- PERLMUTTER, M. A.; MATTHEWS, M. D. Global cyclostratigraphy: a model. In: CROSS, T. (Ed.). **Quantitative Dynamic Stratigraphy**. Prentice Hall, 1989, p. 233-260.
- PINHO, G. C.; COSTA, M. N. C. Fácies eólica na Formação Barra de Itiúba, exemplo de potencial reservatório profundo. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 4, p. 489-508, dez. 1990.
- PROSSER, S. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. In: Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy. WILLIAMS, G. D.; DOBB, A. (Ed.). **Geological Society Special Publication**, n. 71, p. 35-66, 1990.
- SANTOS, C. F. Ciclicidade ao tempo do Andar Buracica (Neobarremiano) da Bacia do Recôncavo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, p. 115-126, 2005. (Edição temática especial: Ciclicidade na Sedimentação).
- SCHALLER, H. Revisão estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, n. 12, v. 1, p. 21-86, 1969.
- SCHOLZ, C. A. Deltas of the Lake Malawi Rift, East Africa: Seismic expression and exploration implications. **AAPG Bulletin**, v. 79, n. 11, p. 1679-1697, 1995.
- SCHOLZ, C. A.; ROSENDAHL, B. R. Coarse-Clastic Facies and Stratigraphic Sequence Models from Lakes Malawi and Tanganika, East Africa. In: KATZ, B. J. (Ed.). Lacustrine Basin Exploration: case studies and modern analogues. **AAPG Memorial**, v. 50, p. 151-168, 1990.
- YIELDING, G.; FREEMAN, B.; NEEDHAM, D. T. Quantitative fault seal prediction. **AAPG Bulletin**, v. 81, n. 6; p. 897-917, June 1997.

expanded abstract

A high resolution stratigraphic study applied to reservoir characterization was developed on lacustrine and deltaic deposits of the Furado Field (Alagoas Sub-basin). These strata represent the lower portion of the Barra de Itiúba Formation (early rifting of the Sergipe-Alagoas Basin), which was possibly deposited on the flexural margin of an initial rift.

The studied area is a mature oilfield containing a significant amount of data (3D seismic, logs, cores, well cuts and dynamic information) that provided a detailed stratigraphic and structural framework. Although this area represents a minor part of the whole basin, its almost complete stratigraphic record has brought to light some features related to the early rifting stages of the Sergipe-Alagoas Basin. The discovery of an active, syn-depositional structural high that impacted the geometry of the deposits provides important information concerning these early stages of rift evolution.

The Furado Field is located close to the present-day basin boundary in an area that makes up several tectonic steps bounded by SE-dipping, low-angle normal faults. These faults record up to 800m of displacement, that on the boundary reaching more than 3.000m. There are two outstanding tectonic features in the study area: an internal horst (Fazenda Tomada High) and a structural depression (Furado Depocenter) located between the present-day basin boundary and the horst. Like many faults, the current border fault (F19) was probably formed in the Aptian, during the rift climax that anticipated the Gondwana breakup. NW-SE, high-angle transfer faults are also present. The most important Aptian faults are mainly oriented to N60E although it is possible to identify some former N-S oriented structures.

The Barra de Itiúba and Penedo formations cover the regressive part of a 2nd order cycle (K34-K36 Sequence) that rests on the Pre-Aratu Unconformity and its lowermost 3rd order sequence (K34/10) is the object of this study. This 3rd order sequence includes three lacustrine systems tracts: the lowstand systems tract (tectonic pulse initiation), which is composed of widespread, medium- to coarse-grained fluvial and deltaic sandstone (higher quality reservoirs); the transgressive systems tract (tectonic pulse climax under wet conditions) that is comprised of lacustrine and prodelta shales and distal delta front, fine-grained sandstones following a retrogradational stacking trend; and the highstand systems tract (tectonic

quiescence), which includes several cycles of delta front progradation and related poor-quality (relative to the lowstand systems tract) reservoirs.

The 4th order sequences are defined by transgressive-regressive cycles driven by climatic changes, according to the spectral analysis performed on lacustrine deposits (transgressive and highstand systems tracts). Usually, each 4th order cycle constitutes an independent reservoir, equivalent to a single reservoir zone of the production stratigraphy.

This high resolution stratigraphic framework was then used to build a 3D geologic model. The stratigraphic architecture was modeled taking into account the deterministic 4th order surfaces. Facies spreading, constrained by the 4th order stratigraphic surfaces, was performed through vertical proportion curves and geometric anisotropy obtained from the facies variograms, thereby reflecting the depositional trend. Four major facies were modeled: medium- to coarse-grained sandstone, very fine - to fine-grained sandstone, shale/siltstone and limestone. This classification not only correctly approaches the depositional system, as the facies categories are equivalent to the facies associations, but also properly discriminates the reservoir quality. Therefore, the paleostructures, including a syn-depositional fault propagation anticline, and their stratigraphic relationships as well as the geometry of the system tracts and 4th order cycles were respected in the 3D-model.

A large amount of post-depositional normal faults, including the present-day basin boundary fault, cut the reservoirs in different scales. By crossing sequence stratigraphy and faults displacement (fault juxtaposition and shale gouge ratio diagrams) it was possible to predict the effect of faulting on distinct stratigraphic units.