

Exemplo da aplicação da estratigrafia de sequências de alta resolução no estudo de reservatórios deltaicos lacustres da Formação Pojuca, Bacia do Recôncavo (Nordeste do Brasil)

Applying high resolution sequence stratigraphy in lacustrine deltaic reservoirs of the Pojuca Formation, Recôncavo Basin (Northeast Brazil)

Michael Strugale

resumo

O presente estudo teve por objetivo reinterpretar o arcabouço estratigráfico e geocronológico das zonas operacionais Miranga e Santiago em um campo de petróleo da Bacia do Recôncavo (Bahia), mediante a técnica de estratigrafia de sequências de alta resolução. O intervalo estudado compreende as zonas de produção Miranga e Santiago, pertencentes à Formação Pojuca (Grupo Ilhas), depositado por deltas lacustres durante o Hauteriviano (Andar Aratu) na fase rifte da Bacia do Recôncavo. Esta unidade é composta por arenitos predominantemente finos, intercalados com siltitos, folhelhos e carbonatos. Algumas das seções pelíticas e carbonáticas configuram marcos grafoelétricos rastreáveis em escala de bacia (Silva, 1993). Foram realizadas análises detalhadas de testemunhos e

perfis, identificação de fácies e associações de fácies, construção de seções e mapas, e interpretação das sucessões verticais, das superfícies estratigráficas e dos *trends* deposicionais. Foram identificadas 12 sucessões verticais (SV) de alta frequência, que representam pulsos de sedimentação deltaica que progradam sobre fácies de prodelta e lago profundo. Em seguida, foram interpretadas e nomeadas as seguintes superfícies estratigráficas: superfície de inundação máxima (SIM), superfície transgressiva com eventual ravinamento por ondas (ST), superfície de regressão máxima (SRM) e limite de sequência (LS). Esta identificação permitiu a nomeação dos tratos de sequência: trato de lago transgressivo (TSLT), trato de lago alto (TSLA) e trato de lago baixo (TSLB). Os tratos de sistema definiram 11 sequências de alta frequência e duas de menor frequência. Cada uma das sequências na alta frequência é constituída por um TSLA e

sobreposta a um TSLT delgado, separados por uma SIM. A exceção fica com a primeira seqüência, no topo, correspondente a dois terços superiores da Zona Miranga, onde ocorre rebaixamento do nível do lago e o registro de um trato de sistema de lago baixo (TSLB) na forma de complexos de canais amalgamados, que erodem o TSLA da seqüência anterior. Em termos da menor frequência, foram identificadas a Sequência A, no topo, e a Sequência B. A Sequência A é constituída predominantemente por um TSLT, que encerra os reservatórios da Zona Santiago, cujo topo é marcado pela SIM (definida na posição do Marco 11). Entre a SIM e o LS há um TSLA que contém, além de uma espessa seção pelítica, a base da Zona Miranga. Acima do LS ocorre o TSLB da Sequência B, constituído por canais amalgamados de base erosiva, seguido de um TSLT e finalmente um TSLA. Em suma, o intervalo estudado configura um padrão retrogradacional que respeita o padrão observado por outros autores em um intervalo de maior amplitude, entre os marcos elétricos de 15 a 7 (Formação Pojuca). Este padrão é quebrado somente na base da Sequência A, onde foi interpretada uma erosão relacionada ao rebaixamento do lago. Observou-se também uma disparidade entre as seqüências estratigráficas na alta frequência e o zoneamento de produção.

Palavras-chave: Bacia do Recôncavo | Formação Pojuca | estratigrafia de seqüências de alta resolução | delta lacustre | reservatório | marcos elétricos

abstract

This study presents a new stratigraphic and geochronological framework interpretation, based on the high resolution sequence stratigraphy technique, of the Miranga and Santiago operational zones in an oilfield in the Recôncavo Basin, in Bahia State. The interval studied includes the Miranga and Santiago production zones, belonging to the Pojuca Formation (Ilhas Group), deposited by lacustrine deltas during the Hauterivian in the rift phase of the Recôncavo Basin. This unit is constituted by predominantly fine sandstones, intercalated with siltstones, shales and carbonates. Some of the pelitic and carbonatic layers defines grapho-electrical markings traceable in the scale of the basin (Silva, 1993). Detailed analyses were carried out on the

cores and well logs, leading the identification of facies and facies associations, the construction of sectionSVs and maps, and interpretation of vertical successions, of stratigraphic surfaces and depositional trends. Twelve high-frequency vertical successions (SV) were identified, which represent pulses of deltaic sedimentation prograding over prodelta and deep-lake facies. Then, the following stratigraphic surfaces were interpreted and named: maximum flooding surface (SIM), transgressive surface with possible wave ravinement (ST), maximum regressive surface (SRM) and sequence boundary (LS). This identification allows the naming of the system tracts: transgressive lake system tract (TSLT), highstand lake system tract (TSLA), and low lake system tract (TSLB). These system tracts define 11 high frequency sequences and two of lower frequency. Each of the high-frequency sequences comprises a thick TSLA overlaying a thin TSLT, separated by a SIM surface. The exception is the first sequence on the top, corresponding to the upper two thirds of the Miranga Zone, where there is a reduction in the level of the lake and the record of a lowstand system tract (TSLB) composed of amalgamated channels, which erode the TSLA of the previous sequence. In terms of lower frequency, Sequence A on the top and Sequence B were identified. Sequence A is constituted predominantly by a TSLT, comprises the whole Santiago Zone, whose top is marked by the SIM (defined in the position of the Marker 11 regional log marker). Between the SIM and the LS, there is a TSLA that contains, in addition to a pelitic thick section, the base of the Miranga Zone. Above the LS is the TSLB of Sequence B, constituted by amalgamated channels with erosional base, followed by a TSLT and finally a TSLA. In summary, the interval studied configures a retrogradational pattern that respects the patterns observed by other authors at an interval of greater amplitude between the log marks of 15 to 7 (Pojuca Formation). This pattern is broken only in the base of Sequence A, where erosion relating to the reduction of the lake was interpreted, Disparity between the high-frequency stratigraphic sequences and the production zoning was also observed.

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

Keywords: Recôncavo Basin | Pojuca Formation | high-resolution sequence stratigraphy | lacustrine delta | reservoir | log marks

introdução

O campo de petróleo estudado se localiza a cerca de 100km a NNE de Salvador (fig. 1). Situa-se no Baixo Estrutural de Miranga, próximo da borda falhada da Bacia do Recôncavo, numa região com acentuado efeito da argilocinese, na forma de diápiros de lama (figs. 2 e 3).

Este trabalho apresenta a análise e a interpretação de dados de testemunhos e de perfis com o intuito de estabelecer o arcabouço cronoestratigráfico entre os diversos elementos identificados, seguindo os conceitos da estratigrafia de seqüências de alta resolução (Vail e Mitchum, 1977, Catuneanu, 2006, Catuneanu *et al.*, 2009) para então determinar a geometria externa e interna dos reservatórios. Esta metodologia foi aplicada nos reservatórios (também zonas operacionais) Miranga e Santiago da Formação Pojuca (Grupo Ilhas), delimitados pelos marcos grafoelétricos 9 e 14 (Silva, 1993). São rochas reservatório siliciclásticas, classicamente definidas como depósitos deltaicos, que progradam a partir de Noroeste (Bacia do Tucano Sul) sobre os folhelhos lacustres da base da Seção Rifte da Bacia do Recôncavo. A Zona Santiago corresponde ao membro homônimo da Formação Pojuca (Silva *et al.*, 2007).

O principal resultado da aplicação desta técnica na reinterpretação de dados de geologia de reservatórios é uma delimitação confiável das superfícies de tempo que limitam os principais intervalos, e ao mesmo tempo como as rochas reservatório se organizam dentro destes intervalos, inclusive em termos de variações lateral e vertical de porosidade. Estas informações são fundamentais para planejar, por exemplo, um projeto de recuperação secundária, com base na modelagem geológica 3D seguida de modelagem de fluxo, que leve em consideração as geometrias externa e interna obtidas por meio da técnica da estratigrafia de seqüências de alta resolução.

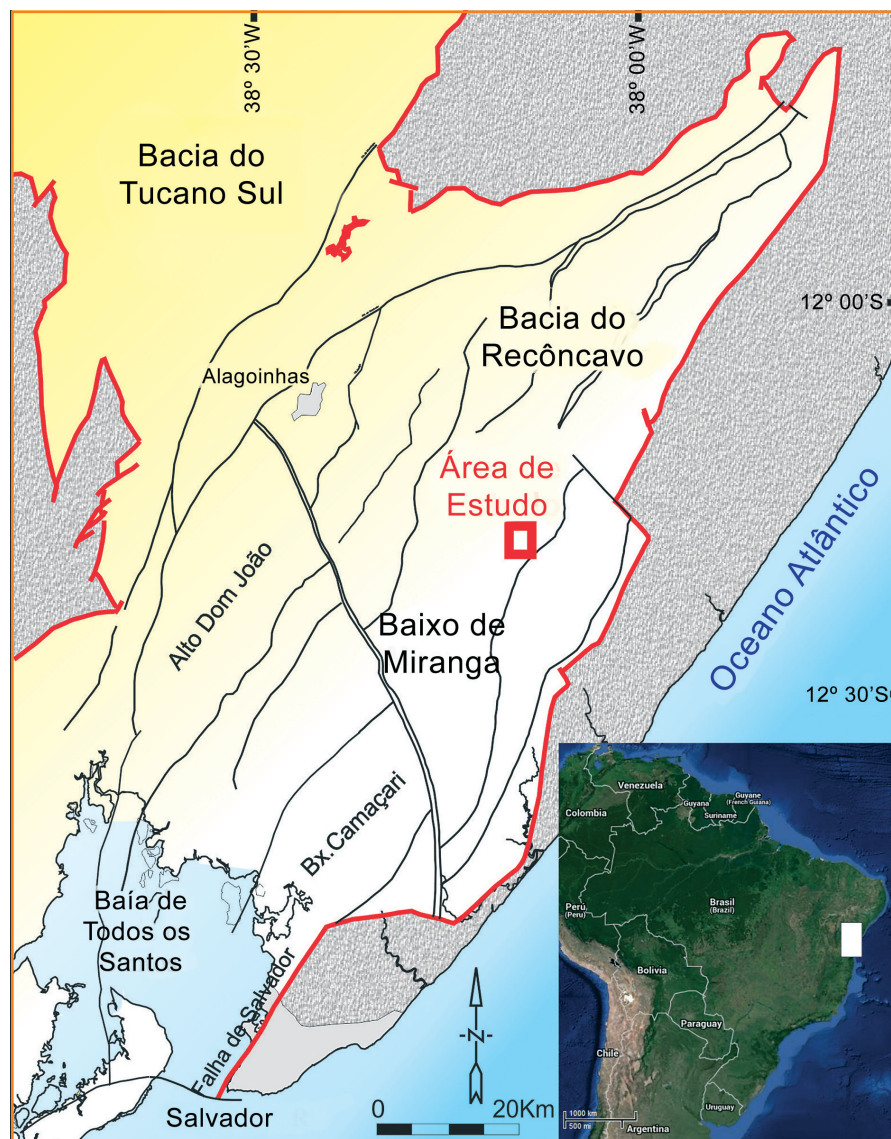


Figura 1- Arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo e localização da área de estudo.

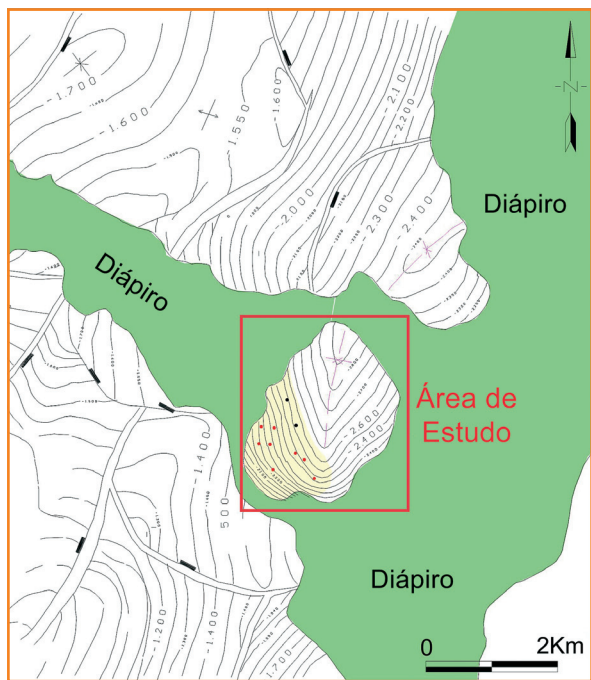
Figure 1- Structural framework of the Recôncavo Basin, showing the location of the study area.

Figura 2

Mapa estrutural sísmico do Marco 11, mostrando também os contornos dos diápiros de folhelho.

Figure 2

Seismic structural map of the Marker Bed 11, showing the geometry of the shale diapirs.



dados disponíveis e metodologia

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados os seguintes dados referentes ao campo estudado:

- 40 poços exploratórios e explotatórios em áreas adjacentes ao campo, com os respectivos perfis e dados de marcadores geológicos e bioestratigráficos, com objetivo de estudar o arcabouço regional;
- interpretação sísmica de alguns horizontes-chave (Marcos 7 e 11) bem como do topo dos diápiros de lama;
- 19 poços do campo de estudo, com perfis elétricos originais e processados, sendo que 12 desses poços atravessaram as zonas de interesse;

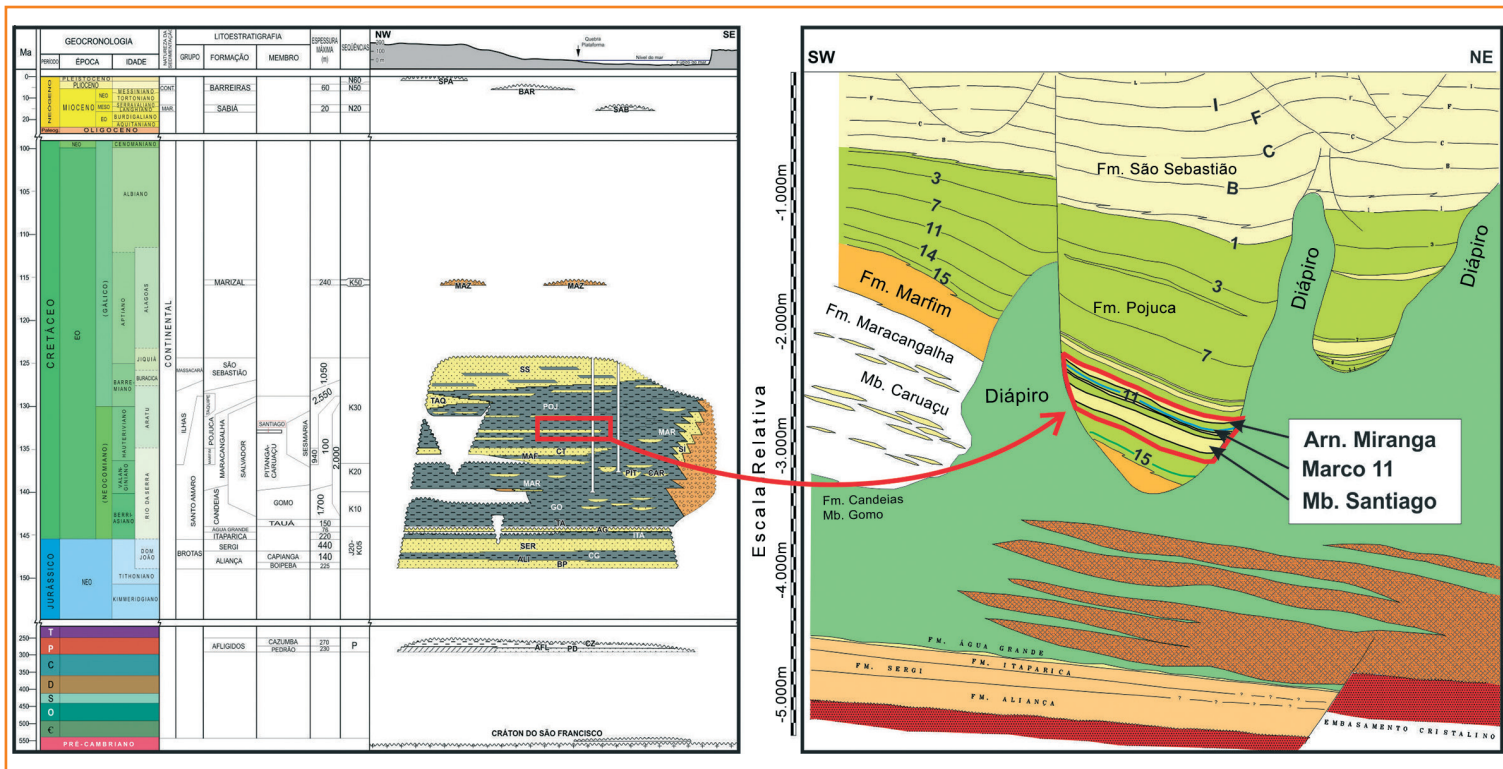


Figura 3- Coluna estratigráfica da Bacia do Recôncavo (Silva et al., 2007), evidenciando a seção estudada. Ao lado, uma seção geológica NE-SW esquemática (strike) do Campo de Miranga Norte, mostrando as relações entre o basculamento das camadas e a argilocinese, bem como as unidades litoestratigráficas e os principais marcos elétricos .

Figure 3- Stratigraphic column of the Recôncavo Basin, evidencing the section studied. Beside, a diagramed geological section NE-SW (strike) of the Miranga Norte field, showing the relationship between the seesawing of the layers and the argilocinese, as well as the lithostratigraphic units and the principal log marks.

- 25 testemunhos de três poços, totalizando aproximadamente 245m de rocha. Vale ressaltar que a testemunhagem no Poço 09 foi praticamente contínua e amostrou cerca de dois terços do intervalo entre os Marcos 11 e 14, onde se posiciona a Zona Santiago.

Os dados disponíveis foram carregados em um *software* de modelagem geológica, incluindo as superfícies sísmicas regionais, os poços e seus perfis, além das fácies e associações de fácies descritas a partir dos testemunhos.

Com base nos perfis elétricos brutos e processados, foram calculados perfis litológicos discretos que distinguem areia e folhelho. As espessuras acumuladas e percentuais de cada litologia, por intervalo e por poço, foram convertidas em mapas de isólitais e de proporção de arenito para cada um dos intervalos estudados. Depois foram construídas seções e mapas regionais, para identificar as variações nas espessuras totais e de areia no entorno da área de estudo. Estes mapas se basearam nos pacotes delimitados pelos marcos grafoelétricos, que são comumente associados às linhas de tempo e utilizados em correlações regionais na Formação Pojuca (Silva, 1993).

Partindo para a escala de detalhe, foram descritas nos testemunhos as fácies, que depois foram interpretadas e reunidas em associações de fácies correspondentes aos subambientes deposicionais deltaicos, cujas assinaturas e padrão de organização vertical (padrão de empilhamento) puderam ser reconhecidos nos perfis. Desta forma, foi possível extrapolar os padrões identificados nos poços testemunhados para os demais poços da área. Esta análise teve como premissa inicial a identificação de ciclos progradacionais, atribuídos ao avanço da linha de costa devido à progradação de deltas sobre fácies de lago profundo. Partindo deste princípio, foram identificadas, nos intervalos testemunhados, sucessões verticais progradacionais e suas respectivas assinaturas em perfis, especialmente nas curvas de *Gamma Ray* e resistividade. Em seguida, estas sucessões foram espalhadas nos poços não testemunhados, tendo como referência inicial os *datums* estratigráficos dados pelos folhelhos de prodelta correspondentes aos marcos grafoelétricos (Marcos 9, 9a, 11, 12 e 14), e posteriormente refinados com os demais folhelhos correlacionáveis entre os poços.

A partir da identificação dos eventos progradacionais, foram reconhecidas 12 sucessões verticais (SV), nomeadas sequencialmente do topo

para a base (fig. 7). Esta etapa foi a primeira tentativa de se estabelecer o *trend* deposicional, isto é, identificar como a linha de costa do lago varia ao longo do tempo. Cada sucessão vertical encerra um ciclo de progradação deltaica ou regressão da linha de costa, na alta frequência.

A partir da delimitação das SV, tratou-se de descrever as características e significados das superfícies que as delimitam. Ao se integrar as feições descritas na rocha com o contexto da superfície em termos de variação da linha de costa, é possível denominá-la em acordo com a figura 4 de Catuneanu (2006). Neste estudo foram identificadas três destas superfícies: superfície de inundação máxima (SIM), superfície transgressiva com ravinamento por ondas (ST) e limite de sequência (LS). Quando se trabalha na alta frequência, é comum que duas ou até três superfícies estejam colmatadas numa superfície única.

A partir do momento em que as superfícies de *shift* de fácies tiveram sua nomenclatura definida, foi possível denominar os tratos de sistema, que são os pacotes de rocha delimitados por estas superfícies. Os tratos são denominados em função do comportamento do nível de base, como por exemplo, trato transgressivo, trato de lago alto etc. A questão teórica relacionada à nomenclatura das superfícies, bem como a denominação dos tratos de sistema serão descritas com mais detalhes no item estratigrafia de sequências.

Definidos os tratos de sistema e seu empilhamento, constatou-se que algumas superfícies que têm significado não somente na alta frequência, mas também numa ordem maior (menor frequência). No caso da área de estudo, por exemplo, foram identificadas 11 superfícies de inundação máxima (SIM) e de limite de sequência (LS) na alta frequência, mas apenas uma de cada tem significado na menor frequência.

fácies e associações de litofácies

Neste capítulo, será apresentada uma síntese das principais fácies descritas nos testemunhos. As fácies foram inicialmente agrupadas, para efeito de descrição, em dois grupos: arenitos/siltitos e folhelhos/argilitos.

Os arenitos possuem granulometria normalmente fina, variando de muito fina a média, grãos subarredondados e bem selecionados. São, em geral, pouco argilosos. Apresentam cor cinza clara a esverdeada, eventualmente manchados de óleo. O cimento é calcítico, imprimindo à rocha uma cimentação moderada, que se intensifica próximo do contato com outras litologias, especialmente folhelhos. Ocorrem em estratos decimétricos a métricos, cujas estruturas internas mais comuns são estratificações paralelas a inclinadas, localmente fluidizadas. Já nos estratos mais delgados predominam arenitos muito finos, com laminações cruzadas, cavalgantes e plano-paralelas. Ocorrem também lâminas e camadas decimétricas de arenitos médios a grossos, com estrutura cruzada acanalada de pequeno porte, associadas com níveis de conglomerados intraformacionais com grânulos e seixos de argilito. As porosidades de perfil e plugue variam entre 12% e 18%, e a permeabilidade média na ordem de dezenas a algumas centenas de mD.

Embora a passagem entre os estratos seja transicional, localmente ocorre transição abrupta entre os estratos, marcada por lâminas de conglomerados intraformacionais. Os siltitos apresentam gradações a arenitos e folhelhos, a depender do empilhamento. Apresentam laminações paralelas a cruzadas, muitas vezes com fragmentos lenhosos, bioturbações, tanto por organismos bentônicos quanto por raízes, e lâminas de argila. A cor predominante é esverdeada, mas em alguns estratos eles ocorrem com cores avermelhadas e aspecto mosqueado. Isto, aliado à bioturbação por raízes, sugere a atuação de processos pedogenéticos.

Os folhelhos possuem cores cinza a esverdeadas, com tons escuros. Frequentemente exibem laminação físsil característica, e comumente ocorrem em camadas de alguns metros. Nestes pacotes mais espessos, ocorrem camadas centimétricas de conglomerados com clastos de folhelho e calcilito. Já os argilitos ocorrem associados aos siltitos, possuindo aspecto maciço e cores esverdeadas de tons mais claros que os folhelhos.

As fácies foram então agrupadas em associações de fácies, geneticamente relacionadas com os subambientes deltaicos. Este agrupamento foi feito com base nos padrões de empilhamento e na sucessão vertical de fácies, o que permitiu distinguir quatro associações de litofácies de ambiente deltaico influenciado por rios: frente deltaica/barra de desembocadura (FD), planície deltaica (PD), prodelta/lago profundo (PrD), e costeiro (*cost*). Tão importante quanto identificar as associações de litofácies foi reconhecer suas assinaturas nos perfis, o que

permitiu fazer as correlações entre os poços. O fato de o Poço 09 ter tido uma testemunhagem extensa foi fundamental para esta etapa.

frente deltaica/barra de desembocadura (FD)

Constitui-se na principal associação de fácies reservatório do campo, correspondendo a 22% do total dos testemunhos analisados. Pode ser subdividida em dois conjuntos, separados essencialmente pelo seu caráter proximal ou distal em relação à clinofórmula deltaica. De forma geral, esta associação se mostra em perfil inicialmente com um padrão *coarsening upward* (seção distal), passando para um padrão *finning upward* (seção proximal). A transição entre estas duas seções costuma ser abrupta em termos de fácies (mais sutil em termos de perfis), com a ocorrência de arenitos médios a grossos, bem como conglomerados intraformacionais (fig. 4). Já os estratos distais são representados por interlaminações de folhelhos, siltitos e arenitos muito finos e argilosos, que apresentam laminações cavalgantes. A bioturbação é pouco presente, e por vezes ocorrem feições de escorregamento. A passagem para as associações de fácies de prodelta (abaixo) e planície deltaica (acima) é gradual.

planície deltaica (PD)

Esta associação de litofácies (fig. 5) é composta de depósitos relacionados a canais distributários, depósitos de extravasamento e baías interdistributárias. De forma geral, ocorrem siltitos e argilitos de cores esverdeadas a avermelhadas, apresentando intensa bioturbação. A associação de bioturbações por raízes, cores avermelhadas e aspecto mosqueado de algumas rochas foram interpretados como resultado de processos pedogenéticos. Os arenitos que ocorrem intercalados apresentam baixa continuidade lateral, são argilosos, com laminações cavalgantes ou paralelas, com a presença pontual de conglomerados com clastos argilosos. São interpretados como registros de canais distributários ou de depósitos de extravasamento.

Em termos de padrão de empilhamento, a associação de PD ocorre tanto isolada, limitada no topo e na base pela associação de PrD, quanto com a associação de FD na base um padrão *finning upward*, finalizando com folhelhos da associação PrD no topo.

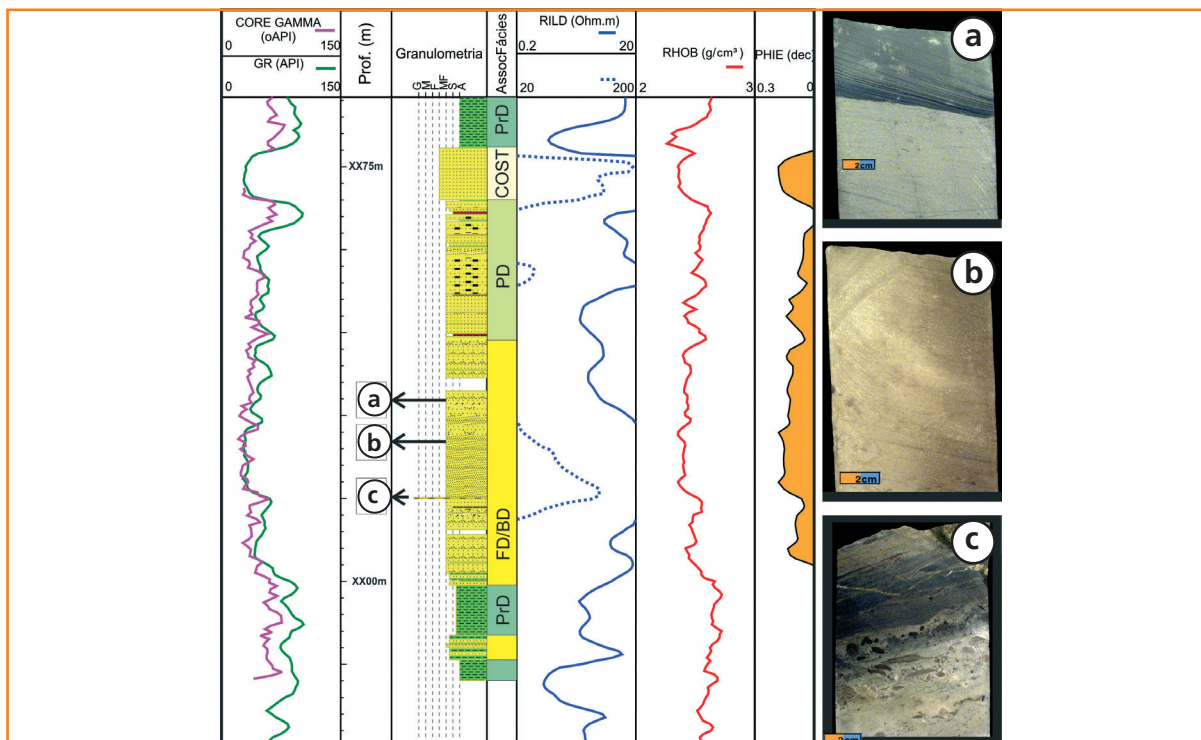


Figura 4

Aspecto de algumas das fácies descritas nos testemunhos do Poço 09 e interpretadas como pertencentes à Associação de Fácies de frente deltaica: (a) arenito muito fino, argiloso, com laminação cruzada acanalada, seguido de arenito argiloso com laminação tangencial; (b) arenito fino com laminação paralela inclinada; (c) conglomerado intraformacional com grânulos e seixos de pelito. Este intervalo também exibe uma sucessão completa de progradação deltaica, iniciando com prodelta, depois frente deltaica/barra de desembocadura, seguida de planície deltaica, costeiro e, por fim, novamente fácies de prodelta. Observar os padrões de perfis de argilosidade, *coarsening upward* na seção basal e *finning upward* na porção superior.

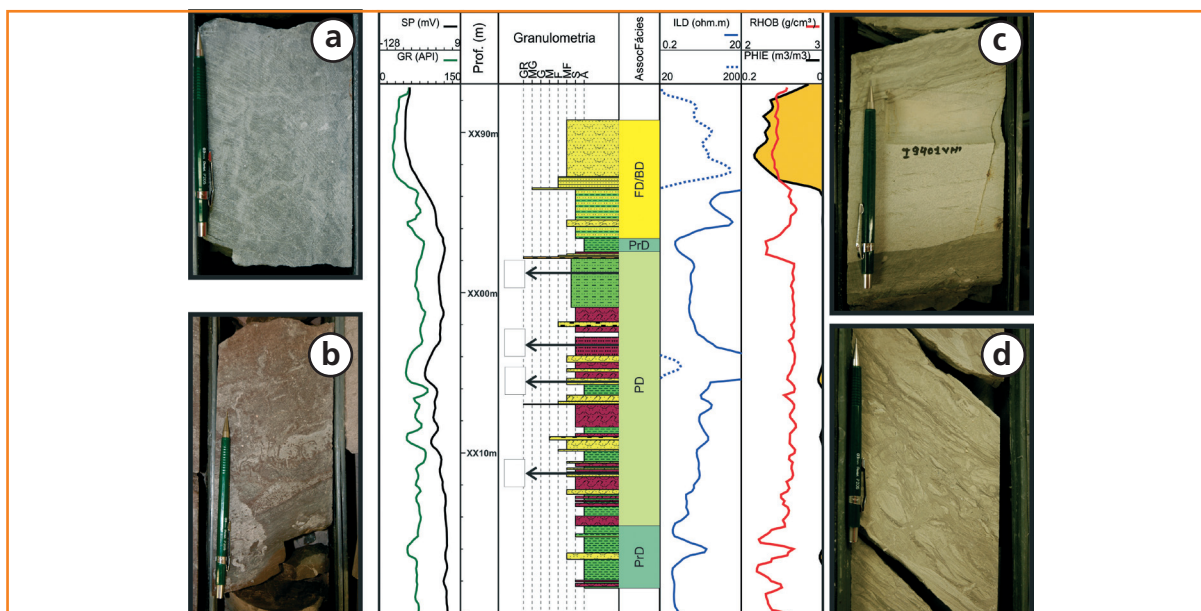


Figure 4

Aspect of some of the facies described in the cores from well Poço 9 and interpreted as belonging to the Delta Front facies association: (a) very fine muddy sandstone with channeled cross-lamination topped by muddy sandstone with tangential lamination; (b) fine sandstone with inclined parallel lamination; (c) intraformational conglomerate with mudstone pebbles. The interval shown is a complete deltaic progradation, starting with prodelta, followed by delta front outflow clay, followed by delta plain outflow, coastal plain outflow, topped by other prodelta outflows. Observe also the patterns of clay well logs, *coarsening upward* at the base and *becoming finer* towards the top.

Figura 5- Exemplos de fácies interpretadas como pertencentes à Associação de Fácies de Planície de Maré no Poço 03: (a) siltito arenoso com intensa bioturbação por raízes, interpretado como paleossolo; (b) argilito arenoso, avermelhado, bioturbado por raízes; (c) arenito muito fino, argiloso, com laminações cavalgantes; (d) arenito muito fino com laminações cavalgantes e bioturbações. Diferentemente da planície de maré da figura 4, esta ocorre sem estar associada a uma Frente deltaica/barra de desembocadura no perfil vertical (talvez lateralmente). Assim, o perfil de argilosidade apresenta padrão serrilhado, e a separação para as fácies de prodelta é mais evidente pelo perfil de resistividade.

Figure 5- Some of the facies interpreted as belonging to the Maré Plain facies association in the well Poço 03: (a) sandy siltstone blurred by root marks, interpreted as paleosoil; (b) sandy mudstone, red colored, blurred by root marks; (c) very fine, muddy sandstone, with climbing ripples; (d) very fine sandstone, blurred by climbing ripples. In contrast with the one presented in figure 4, this occurs without being associated with a deltaic front/ clay outflow in the vertical well log (maybe laterally). Thus, the clay well log presented a serrate pattern, and separation of the prodelta facies is more evident from the resistivity log.

prodelta/lago profundo (PrD)

Esta associação de litofácies é caracterizada por folhelhos cinza escuros, físseis, cujas espessuras podem ultrapassar os 5m em testemunho, correspondendo a cerca de 18% do intervalo analisado (fig. 6). Ocorrem camadas centi a decimétricas de conglomerados compostos por grânulos angulosos de calcilitos e argilitos, em geral sustentados por

matriz argilosa. Apresentam gradação inversa ou são agradacionais.

Em termos de perfis, a associação PrD tem como principal característica os baixos valores de resistividade, ao redor de 2 Ohm.m, o que permite distingui-los, quando justapostos, dos folhelhos e argilitos da associação de fácies de planície deltaica, uma vez que a distinção nem sempre é possível a partir dos perfis de argilosidade (GR e SP).

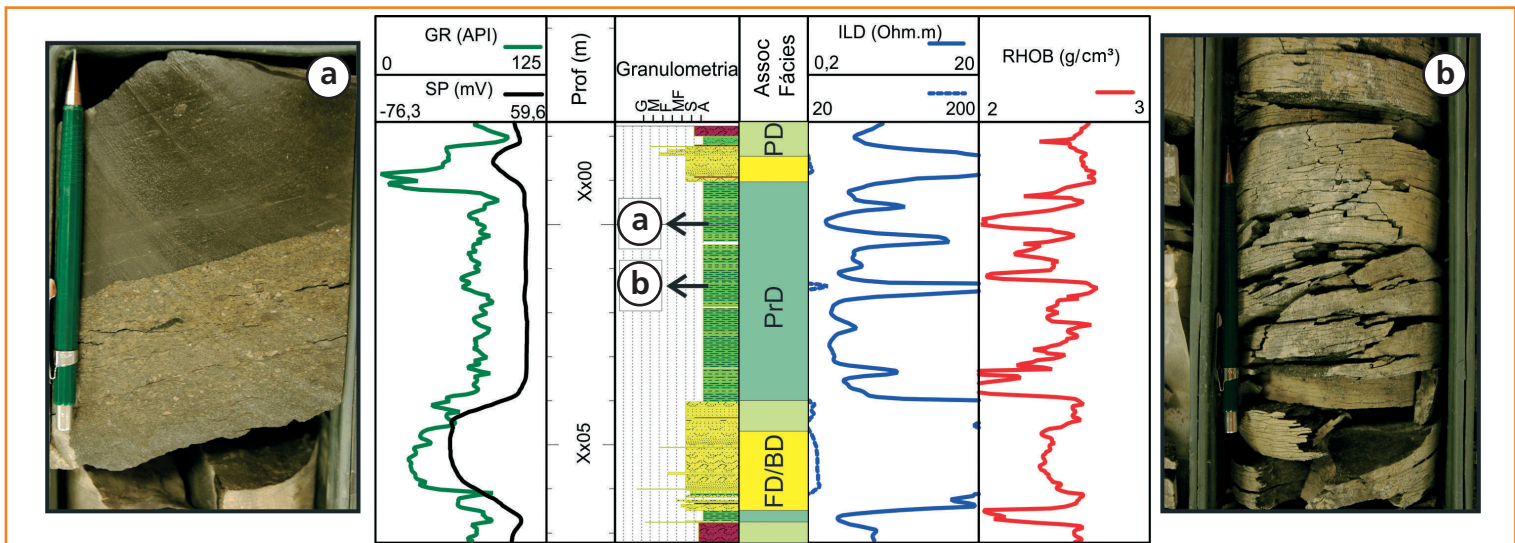


Figura 6- Exemplos de algumas das fácies e das expressões em perfis da Associação de fácies prodelta/lago profundo no Poço 09. As fácies são (a) folhelhos cinza escuros, físseis; e (b) conglomerados com grânulos e seixos de calcilito e argilito sustentados por matriz argilosa, que apresentam altos valores no perfil de resistividade.

Figure 6- Examples of some of the facies interpreted as prodelta/deep lake facies association. The facies are (a) dark grey and fissile shale; and (b) is a conglomerate comprised by granules and pebbles of calcilites and matrix sustained mudstones. It shows high resistivity values in the well logs.

costeiro (cost)

Possui ocorrência bastante restrita nos testemunhos analisados. No testemunho do Poço 09, único onde foi descrito, se apresenta como arenito fino, bem selecionado, maciço e manchado de óleo, imprimindo uma cor acastanhada à rocha. As porosidades e permeabilidades são acima da média das fácies de frente deltaica. O fato de se posicionar entre fácies de planície deltaica na base e prodelta é sugestivo de seu caráter transgressivo.

sucessão vertical de fácies

Após a identificação e extrapolação das associações de litofácies para todos os poços, foi possível distinguir dois padrões (completo e incompleto) de

sucessões verticais de fácies, onde cada uma representa um episódio de avanço de sistemas clásticos para o interior do lago. Os dois tipos de padrões são limitados no topo e na base por folhelhos PrD (fig. 6). No total, foram identificadas 12 sucessões verticais (fig. 8), enumeradas do topo para a base.

O padrão de empilhamento completo é constituído de folhelhos de prodelta na base, sucedidos por frentes deltaicas distais e depois proximais. Sobre as frentes deltaicas ocorre a associação de planície deltaica que, localmente, é encimada pelos depósitos costeiros, que representam depósitos não erodidos do evento transgressivo que culminou na deposição dos folhelhos PrD no topo da sucessão. Como exemplo de sucessão completa, temos a SV inferior da figura 7. Em toda a sucessão sedimentar estudada foram identificadas quatro SV completas (3, 7, 10 e 11). Com exceção da SV 3, as outras sequências ocorrem no terço inferior da seção, sugerindo maior espaço de acomodação durante esse período.

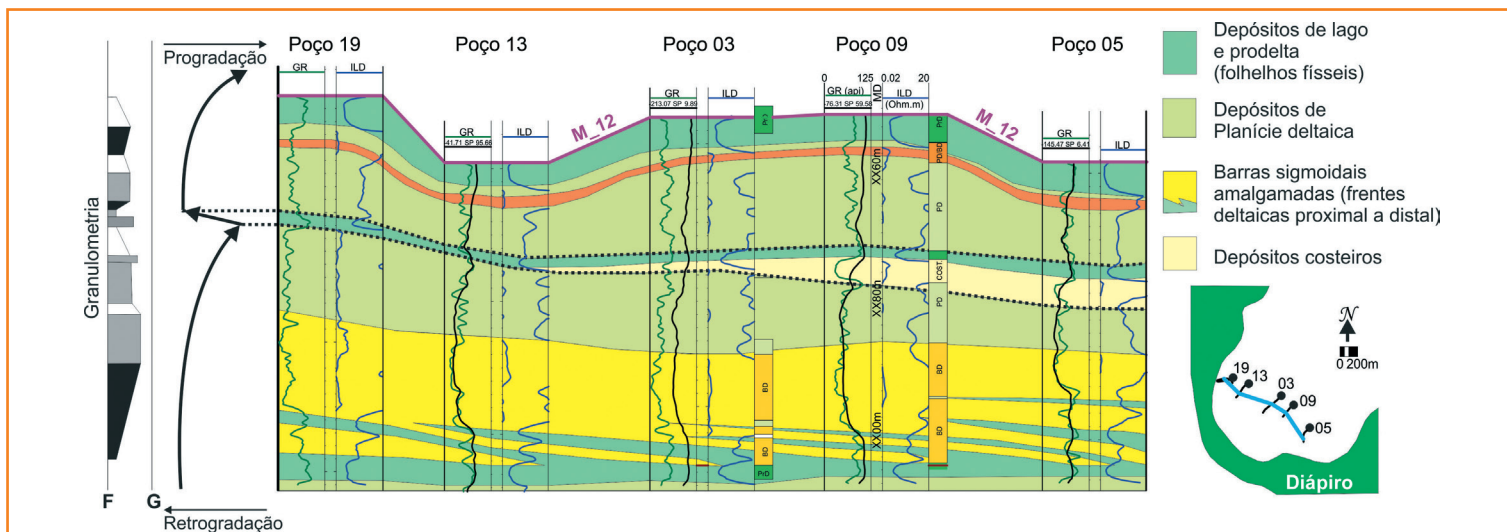


Figura 7- Sucessões verticais elementares, mostrando os dois padrões observados. A sucessão inferior (SV 10) é considerada completa, constituída do empilhamento PrD, FD, PD, costeiro e, já parte de um novo ciclo, PrD. Acima, o segundo padrão de SV observado (SV 9), constituído de PD assentada diretamente sobre o PrD. Escala.

Figure 7- Two elementary vertical successions showing the patterns observed. The lower succession (SV10) is considered complete, constituted by stacking PrD, FD, PD, coastal and, already part of the new cycle, PrD. Above, the second pattern of SV observed (SV9), constituted by PD seated directly on the PrD. Scale.

Nas sucessões verticais incompletas foram identificadas apenas fácies de planície deltaica (ex.: SV superior da fig. 7). Apesar de não configurar uma sucessão “típica” deltaica, é a mais numerosa, totalizando sete pacotes. As SV da metade superior do intervalo estudado são tipicamente incompletas e apresentam padrões de empilhamento sugestivos de canais distributários (*finning-up*) nos

poços próximos da borda NW do campo. As SV 8 e 9 exibem fácies de paleossolos e planícies deltaicas bastante argilosas, sem a presença de canais distributários ou depósitos de extravasamento expressivos. É possível que estas SV não apresentem as fácies de frente deltaica pois elas podem ter se desenvolvido numa região não amostrada pelos poços, mas contemporânea à planície.

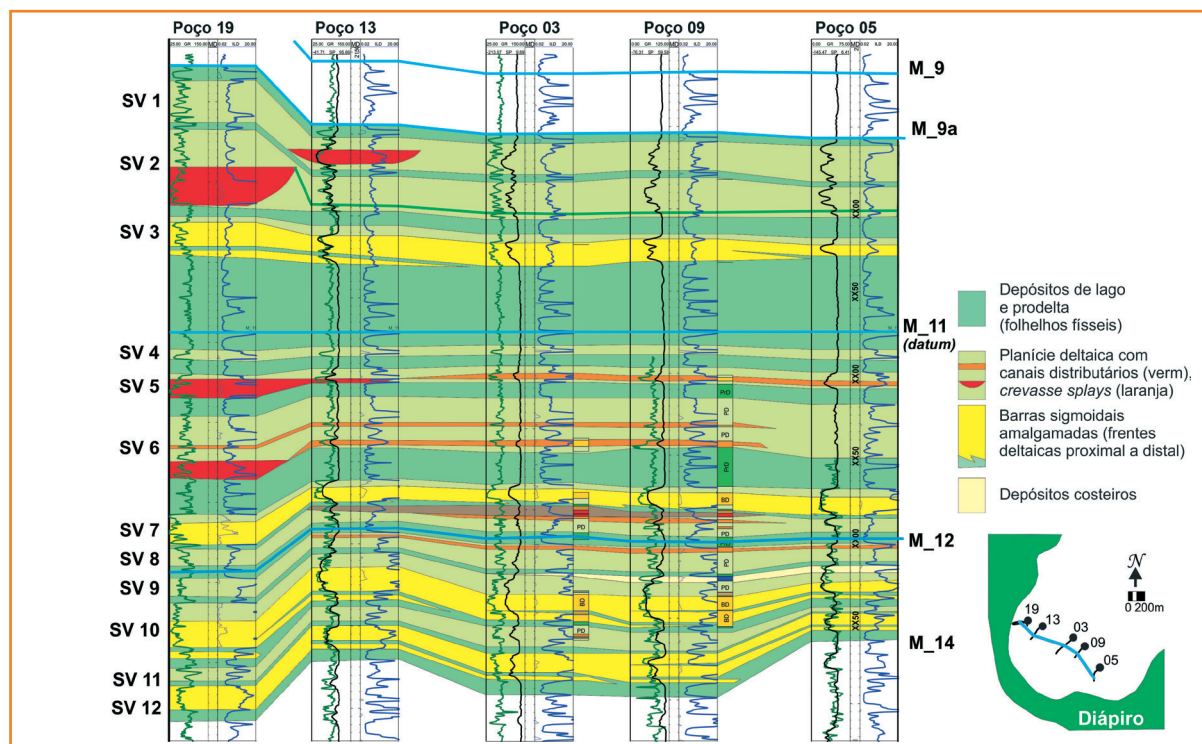


Figura 8
Conjunto das sucessões verticais identificadas no intervalo estudado, onde cada SV é definida por uma camada contínua de folhelho mais a camada de frente deltaica ou planície deltaica acima. Notar o padrão retrogradacional predominante, indicado pelo aumento na proporção de fácies PrD em relação as demais, notoriamente entre a SV 6 e a SV 3.

Figure 8
The set of vertical successions identified in the interval studied, where each SV is defined by a continuous layer of shale with a layer of deltaic front or deltaic plain above. Note the predominant retrogradational pattern, indicated by an increase in the proportion of PrD facies relative to the others, notoriously between SV 6 and SV 3.

superfícies estratigráficas

As superfícies estratigráficas foram definidas a partir da análise das superfícies que delimitam as SV. Foram identificados três tipos de superfícies: superfície de inundação máxima (SIM), superfície transgressiva (ST) e superfícies de mudanças de associação de fácies (*shift* de fácies). Foram ainda definidos limites de seqüências (LS) e superfície de regressão máxima (SRM). Com exceção da superfície de inundação, as demais são sempre, em princípio, superfícies de *shift* de fácies. O nível de importância de cada superfície no empilhamento é função do tipo de fácies que elas separam (fácies de água mais profunda de fácies de água mais rasa, por exemplo), do padrão de empilhamento acima e abaixo da superfície, além de aspectos das rochas que compõem o intervalo.

Figura 9

(a) Fotografia do testemunho mostrando o *lag* transgressivo, relacionado com uma superfície de re-trabalhamento por ondas formada durante a construção de uma Superfície Transgressiva (ST), separando planície deltaica (fácies de paleossolos) (abaixo) de folhelhos de Prodelta. (b) Assinatura da ST nos perfis (notar quebra no perfil ILD), evidenciando sua rastreabilidade entre os poços. Isso permitiu a identificação de uma feição idêntica em uma seção acima, permitindo interpretar outra ST apenas a partir dos perfis (linha verde pontilhada).

Figure 9

(a) Photograph of the core showing the transgressive lag, related with the surface reworked by waves formed during the construction of a Transgressive Surface (ST), separating the deltaic plain (paleosol facies) (below) from the Prodelta shales. (b) ST signature in the well logs (note break in the well log ILD), evidencing its traceability between the wells. This enabled the identification of a form identical to one in the section above, allowing the interpretation of another ST only from the patterns (dotted green line).

superfícies de inundação (SIM)

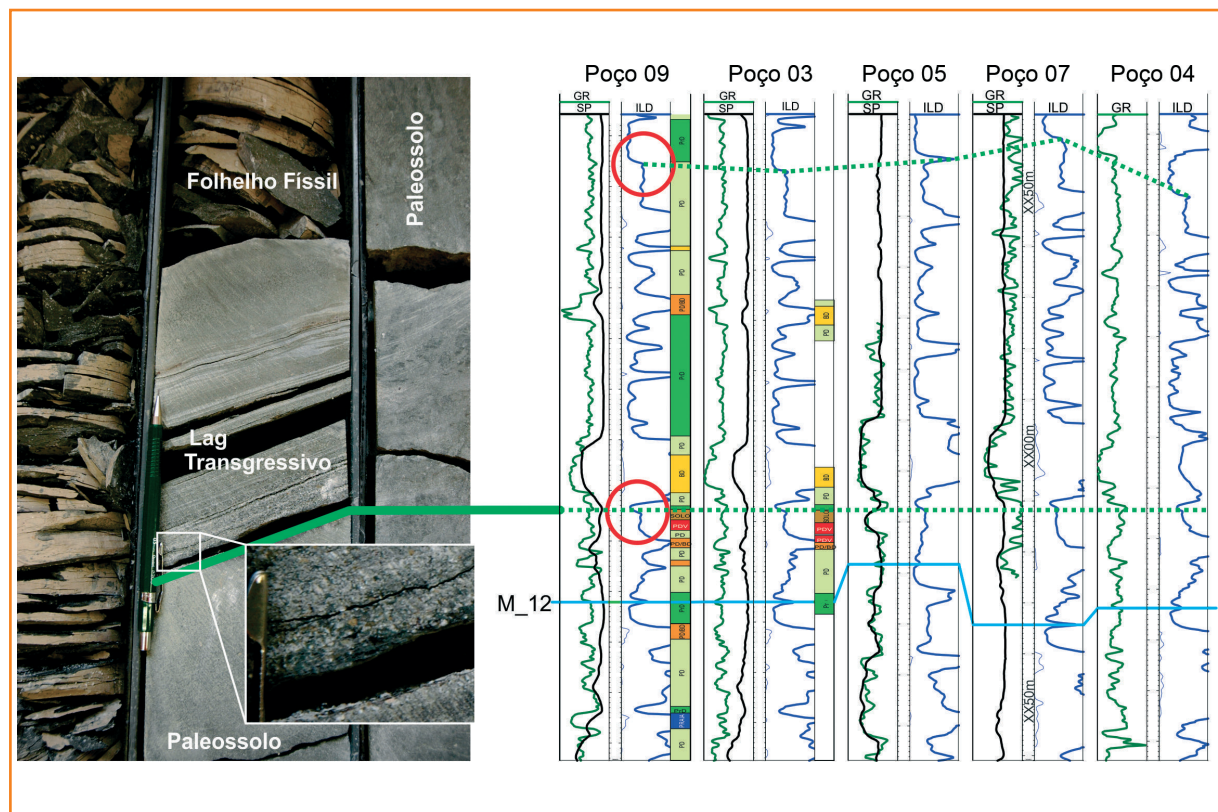
Estas superfícies foram posicionadas dentro das seções argilosas (associação de fácies PrD), nos pontos de maiores valores de GR e menores de ILD. No total, foram identificadas dez superfícies de inundação na alta frequência.

superfícies transgressivas (ST)

São caracterizadas pela passagem de fácies rasas para fácies mais profundas, reflexo da subida do nível do lago. Essa passagem é bem marcada em termos de rocha, pois separa fácies de planície deltaica (abaixo) de fácies de lago profundo (PrD). Ao mesmo tempo, nos perfis a ST é evidenciada pela diminuição abrupta no valor do perfil de resistividade (fig. 9), formando um “degrau” facilmente rastreável nos demais poços. Além disso, no testemunho do Poço 09, foi identificado um nível de conglomerado com grânulos de pelitos e gradação normal, sugerindo que houve um re-trabalhamento (ravinamento) por ondas durante a subida do nível do lago.

limite de seqüências (LS)

Após a análise do arcabouço estratigráfico segundo os princípios da estratigrafia de seqüências, assume-se que a ST está colmatada com o limite de seqüências (LS) de alta frequência, tendo em vista que não foram identificados depósitos de lago baixo, exceto na base da SV 2 (Zona Miranga).



estratigrafia de seqüências

A estratigrafia de seqüências busca, a partir da integração de uma gama de dados geológicos, construir um arcabouço cronoestratigráfico para um dado intervalo deposicional, baseado na variação do nível relativo do corpo aquoso (mar ou lago) e na variação do aporte (controle climático e tectônico). Esta abordagem integrada permite delimitar intervalos geneticamente correlatos separados por superfícies de limites de seqüência (LS).

Os limites de seqüência são superfícies de erosão ou não deposição, e podem ser interpretados na curva de variação no nível do mar/lago. Inúmeros autores, exceto Galloway (1989), posicionam o limite de seqüência no ramo descendente da curva de variação do nível de referência, que pode ser o nível de base (perfil de equilíbrio), nível do mar/lago ou nível relativo no mar/lago (Hunt e Tucker 1992, Posamentier e Allen 1999). O posicionamento do limite de seqüência em relação ao ramo descendente, entretanto, não é consenso entre os autores.

Catuneanu *et al.* (2009) propõem que os estudos em estratigrafia de seqüências devem ser inicialmente conduzidos utilizando aspectos independentes do modelo estratigráfico, isto é, contemplando estudos básicos como identificação dos padrões de empilhamento, terminações dos estratos, acomodação, mudanças de linha de costa etc. O passo seguinte é a designação das unidades genéticas, como por exemplo: regressão forçada, regressão normal – mar alto/baixo, transgressiva, as quais se relacionam diretamente com as trajetórias da linha de costa, da identificação das superfícies estratigráficas e, finalmente, a subdivisão do intervalo estudado em sucessões de unidades genéticas.

Ainda de acordo com Catuneanu *et al.* (2009) a gama de modelos em estratigrafia de seqüências demonstra que não é possível utilizar um modelo único para todos os estudos de casos. Embora todos os modelos representem a sedimentação durante um ciclo estratigráfico completo; a grande questão reside no posicionamento deste limite na curva de variação do nível do mar/lago. Desta forma, esses autores defendem que o emprego de um modelo específico só ocorre quando os critérios específicos do modelo selecionado são claramente atendidos. Três modelos são apresentados como alternativas: Sequências Depositionais, Sequências Depositionais Genéticas (Galloway, 1989) e Sequências

Transgressivo-Regressivas (T-R), onde cada um é adequado a certos contextos deposicionais e aos dados disponíveis. Se nenhum dos modelos se mostrar adequado, o termo “seqüência estratigráfica” pode ser empregado como uma sucessão de estratos depositados durante um ciclo completo de mudança na acomodação ou no aporte sedimentar.

Em estudos de estratigrafia de seqüências em bacias lacustres, há aspectos importantes nas relações entre as diferentes ordens de variações do nível do lago e de aporte que os diferenciam em relação a estudos em bacias marinhas. Talvez o mais importante seja o fato de o controle climático influenciar tanto no aporte quanto no nível do lago, por se tratar de um sistema fechado. Desta forma, se espera certa sincronia entre aumento da pluviosidade, subida no nível do lago e aumento do aporte sedimentar, e da mesma forma, um baixo aporte durante os eventos de nível de lago baixo (épocas de clima seco).

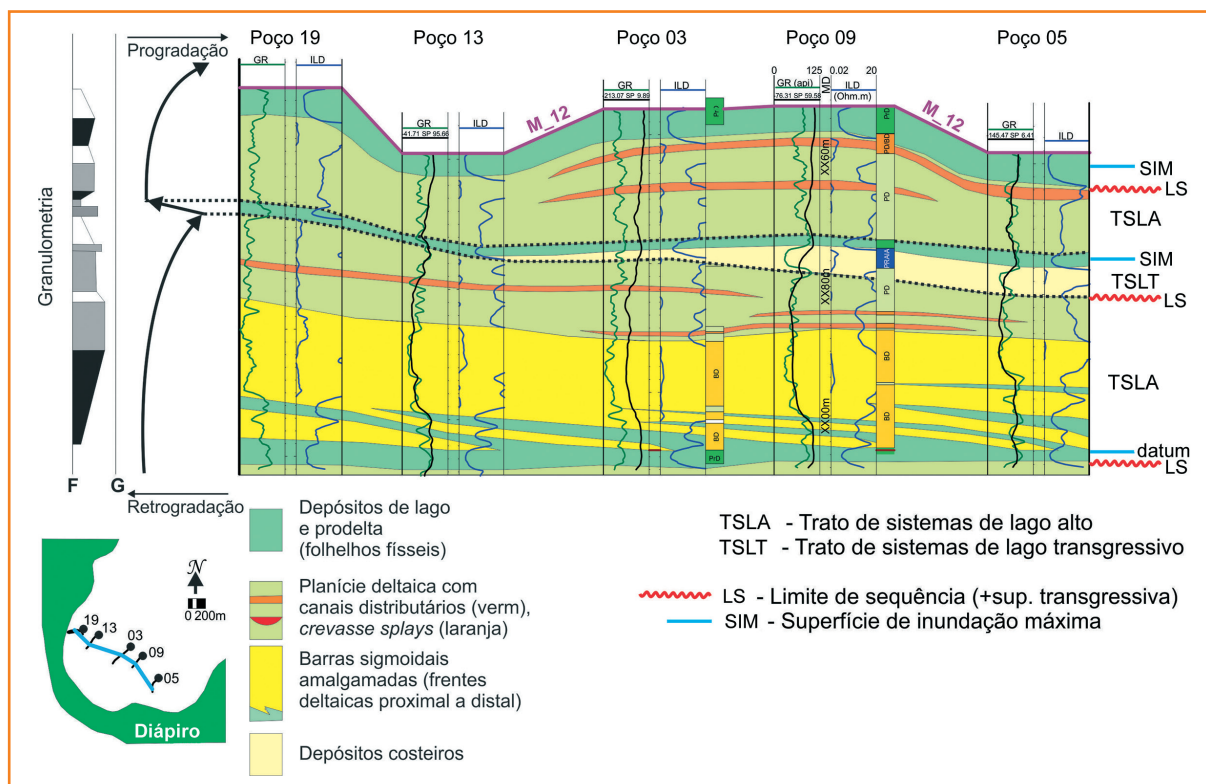
Partindo deste princípio e do fato de a associação de fácies PrD (lago profundo/prodelta) representar episódios de lago em elevação ou lago alto, cada uma das sucessões verticais progradantes construídas por sedimentação deltaica foi denominada, na alta frequência, como trato de sistemas de lago alto (TSLA) e representa quase a totalidade do registro sedimentar. Esta sucessão de alta frequência (fig. 10) demonstra uma contínua subida do nível do lago, onde se intercalam pulsos progradacionais de frentes deltaicas (regressão normal de lago alto) e de transgressão, representadas por fácies costeiras seguidas de fácies de prodelta.

Uma das premissas das interpretações que serão apresentadas é a pouca ou nenhuma influência da tectônica na sedimentação dos intervalos estudados. Ela certamente existe, uma vez que a seção faz parte da fase rifte da bacia, mas a falta de conhecimento do arcabouço estrutural, por conta da baixa qualidade sísmica, não permitiu dar segurança à interpretação de possíveis influências da tectônica na sedimentação. Um estudo com o mesmo enfoque, mas usando poços ao redor, poderia trazer resultados interessantes sobre esse tema.

O limite de seqüência (LS) na alta frequência foi posicionado na superfície de *shift* de fácies onde as fácies de prodelta se sobrepõem às fácies de planície deltaica, com a eventual ocorrência de superfície de retrabalhamento por ondas (fig. 9). Isto implica que não foram depositadas fácies de lago baixo nem transgressivas e a superfície transgressiva

Figura 10
Modelo de seqüências de alta freqüência típico do Membro Santiago, no intervalo correspondente às SV 10 e 9.

Figure 10
Model of the high-frequency sequences typical in the Santiago Zone, in the interval corresponding to SV 10 and 9.



(ST) está colmatada com o LS, e bastante próxima da SIM. Isto ocorre mesmo quando há depósitos costeiros, como na SV 10 (fig. 10). Este mesmo critério foi utilizado para individualizar as seqüências entre as SV 3 a 12, que compreendem a Zona Santiago e a base da Zona Miranga. Alguns detalhes de como foi realizada essa divisão devem ser destacados:

- Pronunciadas espessuras das fácies PrD nas SV 6 (seção superior do MB Santiago) e 3 (Base da Zona Miranga);
- Padrão granulométrico *finning-up* nas SV 6, 5 e 4, determinado pela ausência de fácies típicas de frentes deltaicas como fácies reservatório, as quais são representadas por fácies de PD com canais distributários mais desenvolvidos. Neste caso, é possível que as barras de desembocadura não tenham sido atravessadas pelos poços;
- Ausência de fácies de FD nas SV 8 e 9, onde na primeira deve ser destacada a presença de uma camada de paleossolo, limitada no topo por uma superfície transgressiva, que a separa de fácies PrD.

O critério utilizado para definir os LSs pôde ser aplicado em quase toda a seção estudada (entre as SV 3 e 12), e as seqüências foram numeradas em ordem crescente do topo para a base. Exceção

à regra ocorre no topo da Zona Miranga (SV 1 e 2), onde os canais amalgamados na base deste intervalo foram interpretados como sendo um trato de sistema de lago baixo (TSLB).

Na passagem da SV 3 para a SV 2 se observa uma importante mudança no padrão de estaqueamento, pela presença de arenitos anormalmente espessos, de base abrupta e padrão *finning-up*, os quais se concentram no setor oeste da área (fig. 11). Ao mesmo tempo nota-se que parte da SV 3 é erodida por estes depósitos canalizados, evidenciando que houve um rebaixamento significativo do nível do lago, permitindo o estabelecimento de canais distributários proximais. Ao mesmo tempo, o topo deste complexo de canais é praticamente paralelo à SIM subsequente. Com base nestas evidências, foi interpretada uma superfície de regressão máxima (SRM) na base deste pacote, que define o limite de seqüência. Esta superfície tem um significado na menor freqüência, como será explicado adiante. Possíveis interpretações para esta quebra no registro são reativações tectônicas e/ou movimentações nos diápiros de folhelho, ou mesmo uma forte queda do nível do lago dada apenas por fatores climáticos. Argumento favorável à hipótese tectônica é que a erosão se concentra nas proximidades do diápiro, isto é, de uma falha. Padrões de empilhamento semelhantes são observados nas SV 4, 5 e 6, mas numa magnitude significativamente menor.

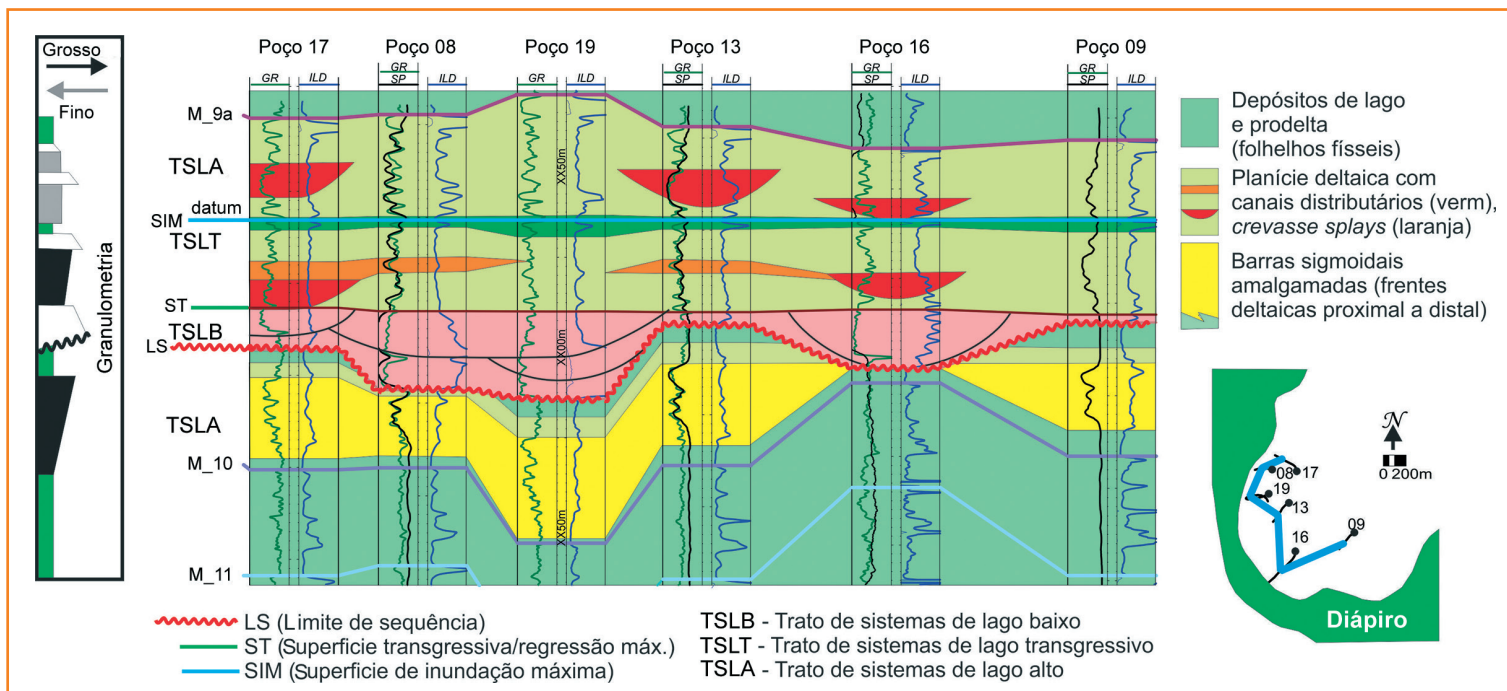


Figura 11- Modelo de seqüências de alta frequência da Zona Miranga, onde se observa a presença dos complexos de canais amalgamados interpretados como TSLB.

Figure 11- High frequency sequence model for the Miranga Zone, where the presence is observed of amalgamated canal complexes interpreted as TSLB.

O complexo de canais amalgamados mostrados na figura 11 foi interpretado como sendo um trato de lago baixo (TSLB), limitado por uma superfície transgressiva. Sobre a ST há pacotes praticamente agradacionais até o Marco 9a (topo da Zona Miranga e do intervalo estudado), dentro dos quais se observam canais discretos e possíveis depósitos de *crevasse-splays*, compondo uma planície deltaica de alta acomodação. Na porção mediana deste pacote se observa uma seção argilosa delgada, com a ocorrência de carbonatos (descritos em amostra de calha), na qual foi posicionada a superfície de inundação máxima desta seqüência. Desta forma, a Seqüência 1 reúne as SV 1 e 2 e representa o único episódio de rebaixamento relativo do nível do lago no intervalo estudado, constituindo assim a única seqüência “completa”, registrando os tratos de lago baixo, transgressivo e de lago alto.

hierarquia das seqüências e história evolutiva

A hierarquia tem por objetivo compreender as ordens de ciclicidade da sedimentação. A

classificação mais usual é feita pela definição de ordens de magnitude dos ciclos, que começam com eventos em escala regional, que envolvem ciclos tectônicos e grandes eventos de mudança bioestratigráfica (primeira e segunda ordens). Passando para ciclos de maior frequência, estes são definidos por variações dentro de um mesmo sistema deposicional (quarta ordem), e variações de sistemas deposicionais (terceira ordem). Para o intervalo estudado, foram reconhecidas duas ordens de ciclicidade. Entretanto, como estas ordens ocorrem praticamente dentro do mesmo sistema deposicional, e as variações de menor frequência aparentemente não se constituem na hierarquia imediatamente maior que aquela identificada por Silva (1993), não foi adotada a numeração hierárquica ordinal, mas apenas a designação maior ou menor frequência. Os resultados desta análise são apresentados na figura 11, que mostra a divisão estratigráfica nas duas ordens identificadas. A tabela 1 indica a correlação entre as seqüências estratigráficas nas duas ordens com as sucessões verticais e as zonas operacionais da acumulação. É interessante antecipar que as zonas operacionais não correspondem ao zoneamento resultante da análise estratigráfica sob a ótica da estratigrafia de seqüências.

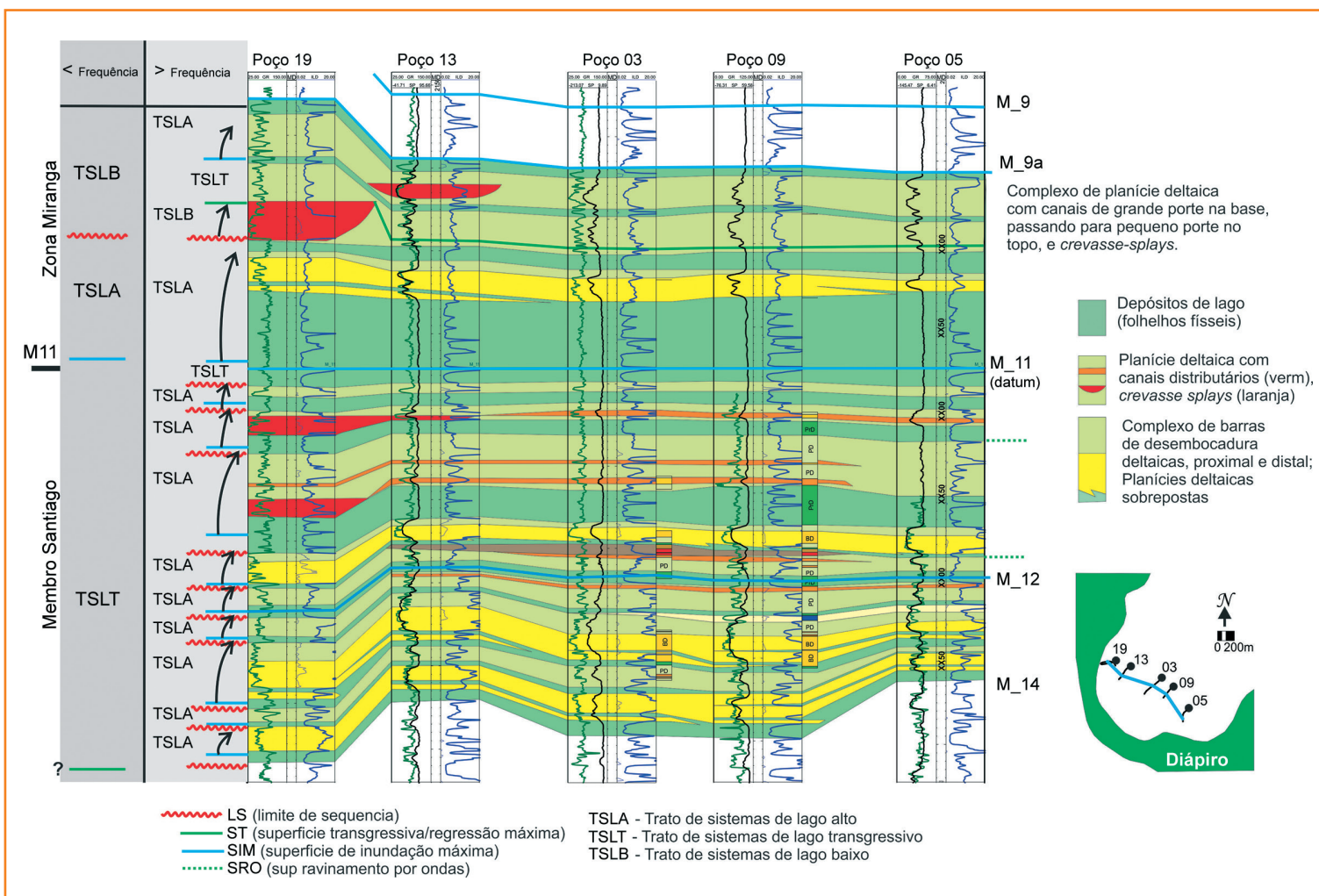


Figura 12- Modelo de seqüências do intervalo de estudo nas duas hierarquias identificadas.

Figure 12- Model of sequences in the interval studied in the two hierarchies identified.

As sucessões verticais (SV) são hierarquicamente as menores unidades identificadas (12 no total) e praticamente coincidem com as seqüências na alta frequência, que constituem 11 unidades ordenadas numericamente. Já as duas seqüências de menor ordem (menor frequência) foram denominadas "A" (topo) e "B" (base).

A subdivisão em duas ordens de menor frequência foi possível por meio da análise integrada dos dados e da escolha de uma superfície de inundação máxima (SIM) como a mais significativa do intervalo estudado, dentre as dez identificadas na alta frequência. A princípio, havia duas seções argilosas como potenciais candidatas, que seriam as seções argilosas basais das seqüências 2 e 6. Dentre essas, optou-se por interpretar a SIM mais

significativa do intervalo analisado na base da Sequência 2 (ou SV 3), por marcar importante mudança na sedimentação, caracterizando a passagem de uma tendência geral transgressiva para regressiva. Essa seção também é representada pela maior espessura pelítica do intervalo e por englobar o Marco 11, importante feição grafoelétrica de caráter regional. Em termos das zonas operacionais, esta superfície corresponde à base da Zona Miranga 3.

Uma vez identificada a SIM da Sequência A, o limite de seqüência (LS) para esta ordem foi definido como sendo o primeiro limite de seqüência na alta frequência acima da SIM. De fato, esta LS marca a base de um sistema de canais amalgamados, de base erosiva (fig. 13), o que representa uma quebra importante no padrão de empilhamento.

Já o topo do complexo de canais é delimitado por uma ST, equivalente a uma Superfície de Regressão Máxima na menor frequência. Desta forma, a seção compreendida entre o SIM e o LS corresponde ao trato de sistemas de lago alto (TSLA), equivalente à Sequência 2 e à SV3. Acima do LS, o restante da Zona Miranga (Sequência 1, SV 1 +2) foi considerado como trato de sistemas de lago baixo (TSLB) da sequência sotoposta (Sequência A). Persistem dúvidas sobre essa designação, uma vez que a seção acima do Marco 9 não foi analisada.

Já o restante da seção, equivalente a todo o Membro Santiago e à base do arenito Miranga, foi denominado Sequência B. Ela é composta por um trato de lago alto (TSLA), representado pela

Sequência 2 (Zona Miranga 3, SV3), mais uma espessa seção argilosa onde se insere o Marco 11, e por um espesso trato transgressivo (TSLT), de acordo com o observado em escala regional por Silva (1993). Este TSLT é formado pelas sequências de 4 até 11 (SV 4 a 12) e contém todos os intervalos produtores da Zona Santiago. A correlação entre as sequências de alta frequência e as zonas de produção não é completa, pois temos seis zonas produtoras para nove sequências na alta frequência (sequências de 3 a 11), uma vez que o zoneamento foi realizado apenas por correlação litológica, balizado nos marcos grafoelétricos (tabela 1). Estes têm sim significado na estratigrafia de alta resolução e podem ser usados para balizar as correlações entre poços.

Figura 13

Mapas de isólitais de arenito de alguns intervalos selecionados das sequências de alta frequência. (a) TSLA da Sequência 1; (b) TSLT da Sequência 1; (c) TSLB da Sequência 1. Observar que as maiores espessuras estão nas proximidades do diápiro. (d) Isólitais de arenito da Sequência 2. A redução na espessura de arenito junto das paredes do diápiro é resultado da erosão pelo TSLB da Sequência 1; (e) Sequência 3; (f) Sequência 4; (g) Sequência 5; (h) Sequência 6; (i) Sequência 7; (j) Sequência 8; (k) Isólitais de arenito da Associação de Fácies costeiro, que constitui a seção superior da Sequência 9; (l) Associação de Fácies planície deltaica da Sequência 9; (m) Associação de fácies de frente deltaica da Sequência 9; (n) Sequência 10; (o) Sequência 11.

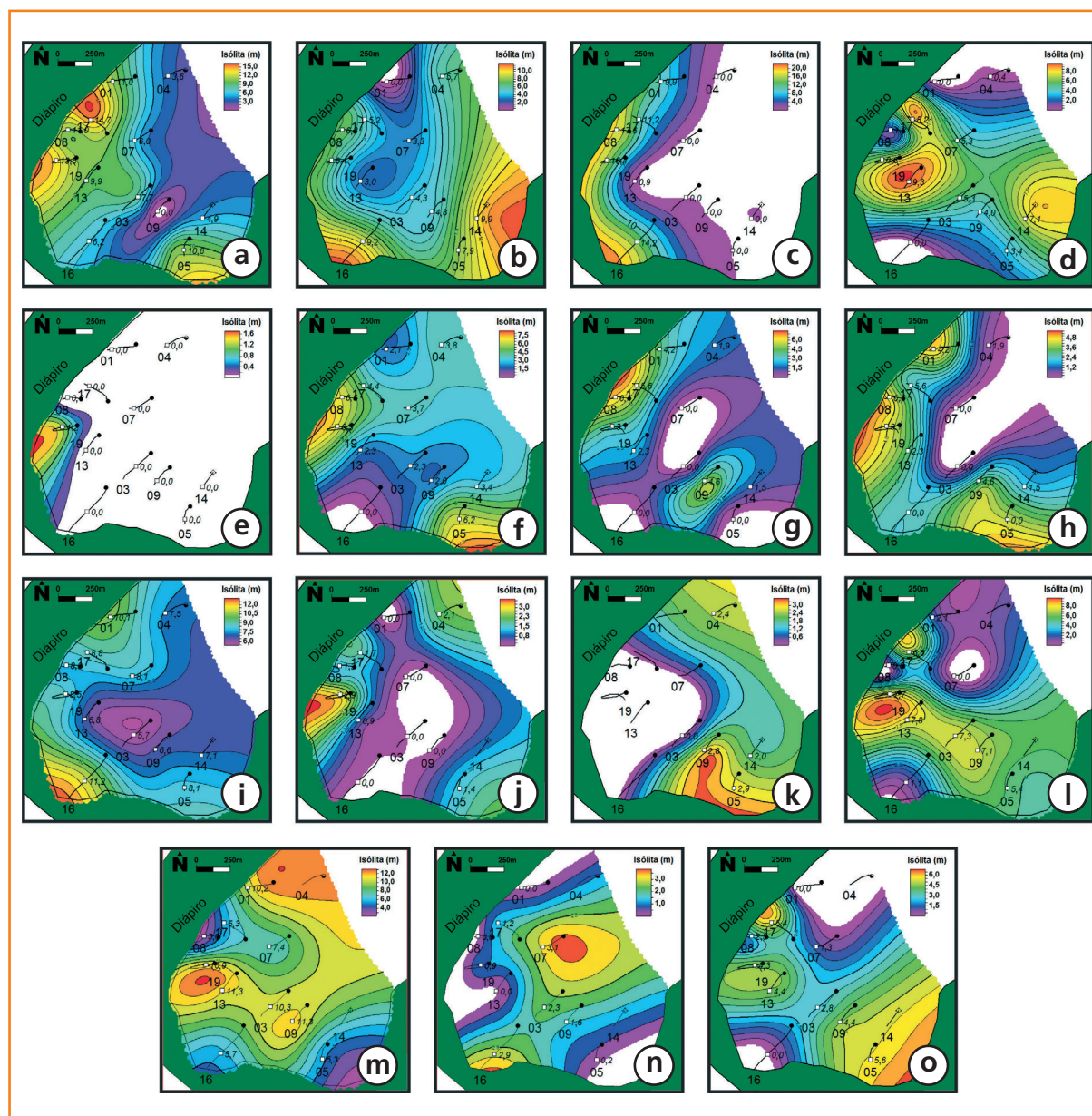


Figure 13

Isolith maps of sandstone in some intervals selected from the high frequency sequences. (a) TSLA of the Sequence 1; (b) TSLT of the Sequence 1; (c) TSLB of Sequence 1. Notice the higher thicknesses are next to the shale diapir border (d) Sandstone isoliths of Sequence 2. Reduction of sandstone thickness near the diapir walls is the result of erosion by TSLB of Sequence 1; (e) Sequence 3; (f) Sequence 4; (g) Sequence 5; (h) Sequence 6; (i) Sequence 7; (j) Sequence 8; (k) Sandstone isolith pattern of the coastal facies association that constitutes the upper section of Sequence 9; (l) Delta plain facies association of Sequence 9; (m) Delta front facies association of Sequence 9; (n) Sequence 10; (o) Sequence 11.

Tabela 1

Hierarquias das sequências estratigráficas e sua comparação com as zonas operacionais do Campo de Miranga Norte.

Table 1

Hierarchies of stratigraphic sequences and their comparisons with the operational zones in the Miranga Norte Field.

Intervalo	Sucessão vertical	Sequência (alta freq.)	Sequência (menor freq.)	Zona operacional
Superior	Sv 1	Seq. 1	Sequência A (TSLB) LS	Miranga 1
	Sv 2			Miranga 2
Médio	Sv 3	Seq. 2	Sequência B (TSLA) SIM	Miranga 3
	Sv 4	Seq. 3		Santiago 1
	Sv 5	Seq. 4	Sequência B (TSLT)	Santiago 2
	Sv 6	Seq. 5		Santiago 3
Sv 7	Seq. 6	Santiago 4		
Sv 8	Seq. 7	Santiago 5		
Inferior	Sv 9	Seq. 8	Sequência B (TSLT)	Santiago 6
	Sv 10	Seq. 9		
	Sv 11	Seq. 10		
	Sv 12	Seq. 11		

Após a apresentação dos aspectos gerais da descrição do intervalo de estudo segundo os princípios da estratigrafia de sequências, é interessante descrever algumas particularidades desta seção. Estas por vezes geraram dúvidas na interpretação, mas ao mesmo tempo trouxeram dados importantes. Nesta parte, será utilizada uma subdivisão alternativa, que tenta reunir seções semelhantes sob os aspectos que serão descritos a seguir (tabela 1). Os intervalos Inferior e Médio equivalem à Sequência A, enquanto o Intervalo Superior equivale à Sequência B.

O “Intervalo Inferior”, que estratigraficamente corresponde à seção basal do Membro Santiago, compreende as sequências de 6 a 11. Ele registra seis eventos (sequências) na alta frequência de progradações deltaicas numa situação de lago transgressivo. Foram observadas algumas anomalias no registro que seria considerado ideal, que consiste em folhelhos de prodelta, seguidos de frente deltaica, planície deltaica, depósitos costeiros e novamente associação de prodelta. Neste trabalho, estas anomalias não foram consideradas suficientes para a quebra das sequências de menor frequência, mas geraram alguns questionamentos.

Uma característica marcante no Intervalo Inferior é a pequena espessura dos folhelhos de prodelta entre as frentes deltaicas. Em um trato transgressivo com aporte constante, espera-se um aumento na espessura de folhelhos em direção à

SIM. Isso implica um aumento no espaço de acomodação, favorecendo inclusive a preservação de depósitos costeiros das transgressões de maior frequência o que, de fato, ocorre no topo da Sequência 3. Assim, a notória ausência das fácies de frente deltaica nas sequências 7 e 8, que delimitam os folhelhos que contêm o Marco 12 (figs. 8 e 12), vai contra a interpretação de um TSLT para todo o intervalo. Essa ausência pode ser atribuída a uma diminuição no espaço de acomodação por redução na velocidade de subida do lago, levando as frentes deltaicas a progradarem mais ou a se desenvolverem fora da área amostrada pelos poços. Além disso, as planícies deltaicas destas sequências apresentam fácies de paleossolo em seus topos, o que reforçaria a tese de rebaixamento do nível relativo do lago. Tais características, por simplificação, foram consideradas como uma mudança no padrão sedimentar na alta frequência, não suficientemente marcantes para separar sequências na menor frequência.

O “Intervalo Médio” é composto pelas sequências de 2 a 5 (SV 3 a 6), tendo como característica principal a ocorrência de espessos folhelhos de prodelta, tanto no topo quanto na base. Soma-se a predominância da associação de fácies de planície deltaica com relação às de frente deltaica nos pulsos de progradação. Em termos de superfícies estratigráficas, este intervalo contém a SIM de menor frequência, posicionada próxima da base do folhelho mais espesso, na posição do

Marco 11. Por definição, acima da SIM temos o TSLA, caracterizado por uma espessa seção pelítica, encimada por uma sucessão completa de progradação deltaica (Sequência 2), a qual é em parte erodida durante o rebaixamento do lago durante a deposição da Sequência 1.

Abaixo da SIM de menor frequência temos três sequências onde foram interpretadas apenas fácies de planície deltaica. Ao contrário do Intervalo Inferior, as fácies reservatório foram associadas a canais distributários e não a frentes deltaicas, o que implica a baixa continuidade lateral dos reservatórios. Seguindo nesta comparação, observa-se que os canais se concentram junto da parede do diápiro (Poço 19), padrão este que se repete na Sequência 1 (fig. 13). Ainda, as planícies deltaicas no Intervalo Médio são notadamente mais argilosas em comparação ao Intervalo Inferior.

A ocorrência das planícies deltaicas sem suas respectivas frentes deltaicas neste intervalo pode, a princípio, causar estranheza. Isto pois estamos próximos do maior nível do lago, culminando num ciclo transgressivo implantado desde a base da seção estudada.

Por outro lado, é comum que o espaço de acomodação diminuía no final do ciclo transgressivo, pois a velocidade de subida do lago também diminui, o que poderia justificar a ausência das frentes deltaicas devido ao *by-pass* para uma posição mais distal.

Os canais distributários que ocorrem nas sequências 4 e 5 poderiam ser os equivalentes proximais das frentes deltaicas. Levando isto em conta, ocorreu a possibilidade de se posicionar a SIM de menor ordem próximo da base dos deltas da Sequência 2, em vez de na base (fig. 12). Desta forma, a desaceleração da subida do nível do lago ocorreria durante a deposição da espessa seção pelítica da Sequência 2.

O “Intervalo Superior” representa uma mudança significativa no padrão de empilhamento. O caráter erosivo da base desta seção (fig. 11) é único no intervalo estudado e, por sua vez foi interpretado como evidência de um rebaixamento no nível do lago. Este rebaixamento induziu a deposição de complexos de canais amalgamados, numa posição bastante proximal em relação aos deltas, que aparentemente preencheram vales incisos. Estes vales se concentram nas bordas W e

SW da área de estudo, onde também se observa a erosão da Sequência 2 (comparar os itens c e d da fig. 13). A localização da erosão sugere a atuação dos diápiros de folhelho como agentes paleogeográficos, especialmente durante a queda do nível do lago. Esta mesma influência, mas em magnitude menor, pode ser observada também no posicionamento dos canais distributários e frentes deltaicas do Intervalo Médio (itens d, e, f, g e h da fig. 13).

O diápiro de folhelho mostrado na figura 2 se estende até a borda falhada do Rife do Recôncavo, se assemelhando a uma muralha. O papel dos diápiros na sedimentação, especialmente quanto à paleogeografia, ainda é bastante duvidoso. Porém, a distribuição das espessuras de arenitos na maioria das sequências de alta frequência pode sugerir que o diápiro tenha atuado como barreira fisiográfica. Nesta hipótese, o Baixo de Miranga poderia ter sido dividido em duas sub-bacias durante o rebaixamento do nível do lago relacionado à base da Sequência 1, até que num dado momento a barreira ter-se-ia rompido, originando estes depósitos canalizados.

geologia estrutural

Além do estudo estratigráfico realizado, alguns aspectos da geologia estrutural foram identificados como importantes na sedimentação do intervalo estudado. A seção geológica da figura 14 mostra a presença de duas falhas alinhadas com a falha de borda a NW do campo, justamente a porção onde a parede do diápiro é mais inclinada, por vezes recumbente. É possível observar também que estas falhas apresentam geometria côncava, típica de falhas de crescimento, e controlam a distribuição das espessuras sedimentares totais do intervalo inferior, mas pouco influenciam na distribuição das isólitias de areia. Supõe-se que as falhas sejam oriundas da instabilidade do substrato relacionada à carga sedimentar sobre um substrato plástico (folhelhos). Nos intervalos Médio e Superior, apenas as falhas de borda do campo, especialmente aquelas a NW e SE, afetam a distribuição das espessuras sedimentares, especialmente na disposição dos complexos de canais distributários.

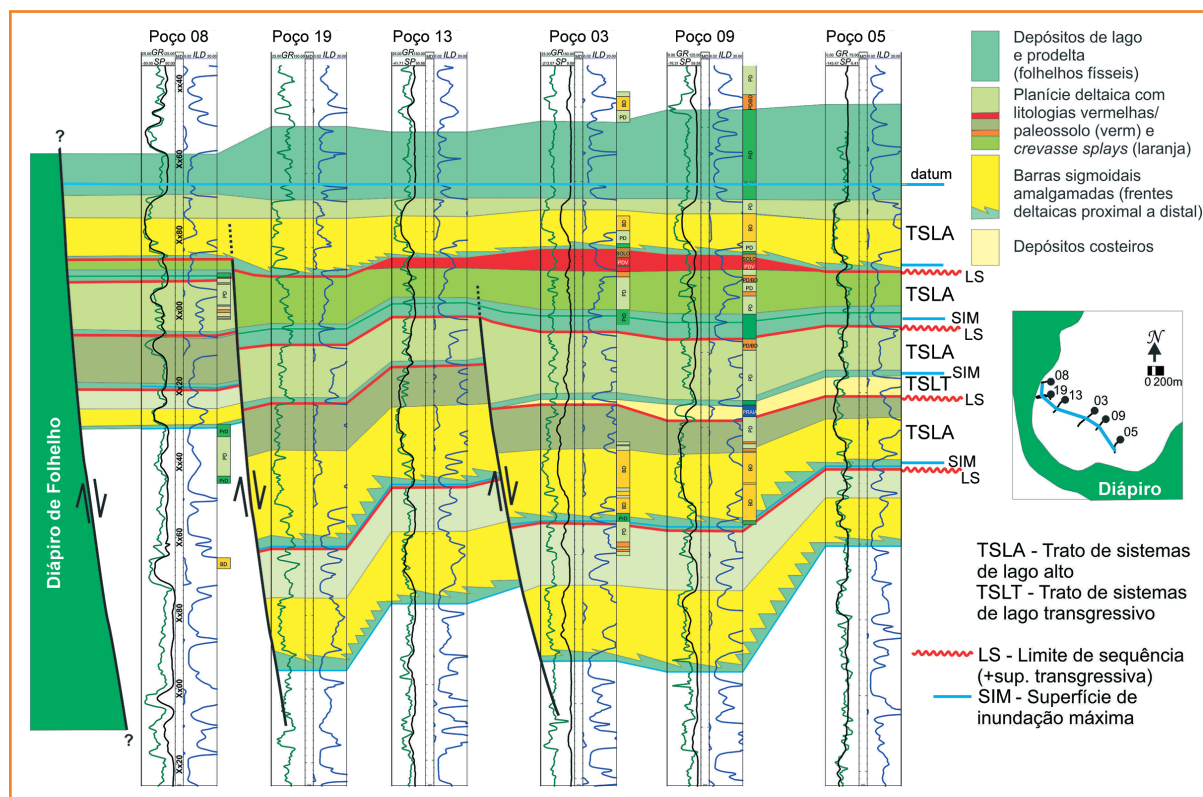


Figura 14- Falhas sin-deposicionais identificadas no Intervalo Inferior (Membro Santiago).

Figure 14- Syndepositional faults, identified in the lower interval (Santiago field).

considerações finais

A análise dos testemunhos permitiu a identificar um grande número de fácies agrupá-las em quatro associações, que foram interpretadas com relação aos subambientes deltaicos: frente deltaica/barra de desembocadura, planície deltaica, costeiro e prodelta/lacustre. A partir da individualização das associações de fácies, foi possível identificá-las nos perfis de poços testemunhados e posteriormente extrapolar essa interpretação para os outros poços.

Conhecida a distribuição vertical e horizontal das associações de fácies, foram definidas 12 sucessões verticais (SV), cada uma representando um evento de progradação deltaica. A sucessão dita completa contém da base para o topo, associação de prodelta, frente deltaica e planície deltaica, e eventualmente a associação costeira no topo. Entretanto, em sete das 12 SV foi possível identificar somente a associação de planície deltaica (SV incompleta).

Em seguida foram caracterizadas as superfícies limítrofes das sucessões verticais. Foram identificadas e nomeadas as superfícies de inundação máxima (SIM), transgressiva (ST), de regressão máxima (SRM) e limite de sequência (LS). Em duas oportunidades foi identificada em testemunho uma superfície transgressiva com retrabalhamento por ondas, separando as fácies de frente deltaica das fácies de prodelta.

Em 11 das 12 SV, o limite de sequências (LS) na alta frequência coincide com a superfície transgressiva (ST).

Com base nessa premissa, foram identificadas 11 sequências de alta frequência, nove na Zona Santiago e duas na Zona Miranga. As duas sucessões verticais do topo da Zona Miranga, entretanto, apresentam feições de perfis (padrão *finning-up*) da base deste intervalo que foram interpretadas como depósitos de canais amalgamados (fluviais ou deltaicos proximais) com base erosiva. Este pacote foi interpretado como depositado durante uma queda do nível do lago (regressão), e é um caso único no intervalo estudado, pois temos o

limite de sequência definido como uma superfície de regressão máxima.

Por meio de uma análise mais regionalizada, utilizando poços de fora da área e ao mesmo tempo identificando superfícies de alta frequência que possam ter significado regional, foi identificada uma ordem de frequência menor. As duas superfícies identificadas como constituintes desta ordem são a SIM da Sequência 2 e o LS na base da Sequência 1, que são a SIM (Marco 11) e o LS de uma sequência de menor ordem denominada sequência B. Esta sequência é formada por um trato de lago transgressivo (TSLT), que compreende as sequências de 3 a 11 (equivalentes ao Membro Santiago) e um trato de lago alto (TSLA), equivalente ao restante da Sequência 2 (base da Zona Miranga). Acima desse LS, está a Sequência A, representada apenas por um trato de lago baixo (TSLB) no intervalo estudado, e equivalente ao restante da Zona Miranga.

Uma vez definido o arcabouço estratigráfico nas maiores e menores frequências, foi feita uma correlação entre as unidades estratigráficas e as zonas operacionais, a qual foi definida basicamente por litoestratigrafia. As 11 sequências de alta frequência contêm nove zonas operacionais. O que mais chama a atenção é que a Zona Miranga 3 é na verdade a seção superior da mesma Sequência B que contém as zonas Santiago 1 a 6. Isso é consequência do fato de a divisão das zonas operacionais não ter seguido o critério da estratigrafia de sequências, mas apenas o critério litológico.

Com relação à geologia estrutural, sugere-se que as falhas e diapirismo de folhelhos foram contemporâneos à sedimentação. Pelo menos duas falhas, com crescimento de seção e provável geometria em *rollover*, estavam ativas durante a deposição da Zona Santiago. A argilocinese parece ser o motor destas falhas, e ao mesmo tempo controlou a colocação dos canais durante a regressão na base da Sequência B.

agradecimentos

Aos colegas Aglaia Brandão, Antônio Magalhães, Carlson Leite, Paulo Milhomem, Flávio Oliveira, Thaís Kazmierczak, Claudineuza Neves e Rita Koga pelas discussões e auxílio nos trabalhos de análise dos testemunhos.

referências bibliográficas

CATUNEANU, O. **Principles of sequence stratigraphy**. Amsterdam: Elsevier, 2006. 375 p.

CATUNEANU, O.; ABREU, V.; BHATTACHARYA, J. P.; BLUM, M. D.; DALRYMPLE, R. W.; ERIKSSON, P. G.; FIELDING, C. R.; FISHER, W. L.; GALLOWAY, W. E.; GIBLING, M. R.; GILES, K. A.; HOLBROOK, J. M.; JORDAN, R.; KENDALL, C. G. St. C.; MACURDA, B.; MARTINSEN, O. J.; MIALL, A. D.; NEAL, J. E.; NUMMEDAL, D.; POMAR, L.; POSAMENTIER, H. W.; PRATT, B. R.; SARG, J. F.; SHANLEY, K. W.; STEEL, R. J.; STRASSER, A.; TUCKER, M. E.; WINKER, C. Towards the standardization of sequence stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 1-33, Jan. 2009.

GALLOWAY, W. E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, [Tulsa], v. 73, n. 2, p. 321-333, Feb. 1989.

HUNT, D.; TUCKER, M.E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge system tract: deposition during base-level fall. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 81, n. 1/2, p. 1-9, Nov. 1992.

POSAMENTIER, H.T.; ALLEN, G.P. **Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications**. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1999. 210. p. (SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, 7).

SILVA, H. T. F. **Flooding surfaces, depositional elements, and accumulation-rates – characteristics of the lower cretaceous tectono-sequences in the Recôncavo Basin, Northeast Brazil**. 1993. 312 f. Thesis (PhD)-University of Texas at Austin, Austin, 1993.

SILVA, O. B.; CAIXETA, J. M.; MILHOMEM, P. S.; KOSIN, M. D. Bacia do Recôncavo. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 423-431, maio/nov. 2007.

VAIL, P. R.; MITCHUM JR., R. M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: part 1, overview. In: Payton, C. E. (Ed.). **Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 51-52. (AAPG Memoir, 26)

expanded abstract

Sequence stratigraphy is widely embraced as a new method of stratigraphic analysis by both academic and industrial practitioners. This new method has considerably improved our insight into how sedimentary basins accumulate and preserve sediments. Based on the concepts of sequence stratigraphy a new interpretation of the geometry and evolution of the lacustrine delta reservoirs of Miranga and Santiago production zones is presented.

The studied oilfield is located in the eastern part of the Central Compartment of the Recôncavo Basin, onshore in Bahia State, Northeast of Brazil. The basin's three main structural compartments (South, Central and Northeast) are defined by two strike-slip, transfer fault zones: Mata Catu to the south and Itanagra-Araçás to the north. This basin evolved during the Early Cretaceous era, when a half-graben structure (faulted margin is the SE border) was filled during the rift phase with lacustrine shales (Candeias fm.), followed by a thick clastic wedge that progrades mostly from NW to SE. The stratigraphic record of this clastic wedge started as high density debris flows (Maracangalha fm.), followed by deltaic complexes (Marfim and Pojuca fms.) and topped with fluvial deposits (São Sebastião fm.).

The faulted margin shows a conglomerate wedge deposited by alluvial fans. An important feature of this basin is the presence of shale diapirs in the depocenters, which movements tilted the beds to become a lateral seal.

The studied reservoir belongs to the Pojuca fm. It is characterized by the intercalations of lacustrine shales and deltaic sandstones, deposited during the Hauterivian Age. Some of these shales contain organic levels, and ostracoid grainstones, whose log signatures are considered regional marker beds and log markers. The Miranga Zone is delimited by Marker 9 at the top and by Marker 11 at the base, while the Santiago Zone is topped by Marker 11 and extends through Marker 12, down to Marker 14. The Santiago production Zone has an equivalent in the lithostratigraphic column, the Santiago Mb.

The available dataset are well logs, 245m of cores and some seismic surfaces, including the top of the shale diapirs. This dataset was loaded in a Petrel™ project, where stratigraphic and structural

sections were built. One of the cores is continuous and represents more than 150m of the Santiago Zone. After the facies identification and description, they were grouped into four facies associations related to the deltaic sub-environments: Delta Front (FD), Deltaic Plain (PD), Prodelta (PrD) and Coastal facies association (Cost). Notice that the abbreviations used in this expanded abstract are the same in figures used in the main text.

The Delta Front represents the main reservoir facies. It contains cross-bedding to convoluted fine sandstones, some of them with a sharp base associated with a thin layer of intraformational conglomerate (distributary channel), while others with tangential cross-bedding showing mud drapes at the base of the layer (mouth bar). Another facies, composed by interlaminated fine sandstones and siltstones, are interpreted as distal sections of mouth bars. The well-log expressions of FD facies association are funnel-shaped at the base and bell-shaped at the top.

The Delta Plain facies association is highly heterolytic, dominated by intercalations of siltstones, mudstones and fine sandstones, some of them showing climbing ripples or parallel lamination. Root marks and paleosoils are also common, especially at the top of each cycle. Its expression in the well logs is a serrate shape, high values in GR and values about 6 to 8 Ohm.m in the resistivity logs. This signature helps to distinguish this association from the Prodelta association, which usually shows similar records of GR log but lower values (2 Ohm.m) in the resistivity log.

The Prodelta association is mostly composed of shales, with few mudstones, calcilitites and conglomerates. The least common facies association is the Coastal, identified as 1,5m thick, clean, poorly laminated, fine sandstone, showing a box shape in the well logs.

The analysis of facies associations and its expressions in the well logs led to the identification of twelve Vertical Successions (SV), where the typical SV represents a full cycle of deltaic progradation, with Prodelta facies association on the base, followed by Delta Front, Delta Plain, and Coastal facies on top. The SV were numbered sequentially from top to the base. Only one complete SV was found, in the Santiago Zone (SV 10). All the SV have the Delta Plain facies association, while four have the delta front facies and only SV 10 shows coastal facies. Based on the integration of facies

association, vertical successions and its expression in the well logs, it was possible to recognize the lateral and vertical distribution and geometry of the strata. Thus, it allows the interpretation of the changes of water depth over time.

In order to improve the interpretation of lake level changes, it is important to recognize stratigraphic surfaces in the cores and check for their signatures in the well logs. A transgressive Wave Ravinement Surface (ST) was identified in a core as a thin layer of intraformational conglomerate on the top of a paleosoil, followed by prodelta shales.

Regarding the well logs, the GR values are similar, but the ILD log shows a shift clearly recognized in the surrounding wells. In principle, overlying the ST, the maximum flooding surface (SIM) should be identified within the PrD shales, and be followed by the Delta Front or the Delta Plain facies. On the other hand, the Sequence Boundary (LS) is expected to be found below the ST, defining the regressive deposits in a generic sense. Considering that the SIM is very close to the ST, the LS surface is equivalent to the ST, except in two situations: 1) where coastal deposits occur, representing a transgressive deposition (for example, the SV 10) and 2) in SV 2 (Miranga Zone), where regressive deposits, represented by proximal distributary channels/fluvial channels, are present.

Through the integration of the SV and the stratigraphic surfaces, eleven high frequency sequences were identified. Ten of them (from number 2 to 11) are comprised of a thin Transgressive System Tract (TSLT) on the base followed by a Highstand System Tract (TSLA), which represents the majority of the sequence thickness. The exception is the Sequence 1, comprising the SV 1 and 2, where below the Transgressive System Tract a thick section of channel-fill sandstones was interpreted as Lowstand System Tract (TSLB). The deposition of the TSLB clearly eroded the TSLA delta front deposits from the underlying Sequence 2.

The sequences described above are related to the higher frequency of lake level changes. Through analysis of these high frequency sequences and the stratigraphic surfaces, two of the surfaces are more relevant: 1) the SIM in the base of Sequence 2, near to the log marker 11 within the thickest shale in the section, and 2) the LS at the bottom of Sequence 1, the only lowstand/regressive deposits described. Using these criteria, it is suggested that the log Marker 11 and the LS that defines the

base of Sequence 1 corresponds to the SIM and a LS of a lower frequency order of sequence, called Sequence B. Overlying the LS is Sequence A. Both sequences are incomplete, since the studied interval is restricted in thickness. The Sequence A is constituted by a TSLB. The Sequence B is mostly formed by a TSLT, comprising all the reservoirs of Santiago Zone. After the SIM there is a thin TSLA, comprising thick shale on the base and highstand deltas on the top, representing the Miranga 3 production zone.

During the stratigraphic study, it was possible to identify some important aspects regarding the structural evolution. The isopach maps plus stratigraphic sections show evidence of fault movement during the deposition of the lower part of the studied section. There are two growth faults oriented NE-SW (parallel to the main diapir wall) with a probable listric geometry, due to the position of paleosoil layers. The activity of these faults stops near Marker 11.

autor



Michael Strugale

E&P Engenharia de Produção
Reservas e Reservatórios
Gerência de Geologia de Reservatórios

michael_strugale@petrobras.com.br

Michael Strugale é graduado em Geologia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 2001. Em 2002 obteve o grau de Mestre também pela UFPR, na linha de pesquisa em Geologia Exploratória. Ingressou na Petrobras em 2002 como geólogo de poço, pela então UN-BA. Em 2005 passou a trabalhar na área de reservatórios, no Ativo de Produção Sul da UN-BA, e em seguida na Caracterização Especial de Reservatórios do Suporte Técnico (UN-BA/ST/CER), onde trabalhou com os campos de Miranga, Água Grande, Jandaia, Miranga Norte e Fazenda Onça. Desde 2010 trabalha na Gerência Corporativa de Geologia de Reservatórios (E&P-CORP/RR/GR), no grupo de Geologia Estrutural e Geomecânica.