

Rastreabilidade de sequências de alta resolução ao longo da Sub-bacia de Metán-Alemania (Maastrichtiano da Bacia de Salta – Argentina): anatomia estratigráfica detalhada de um sistema lacustre sob influência de processos microbiais

High-resolution sequence tracking in Metán-Alemania Sub-basin (Salta Basin Maastrichtian – Argentina): detailed stratigraphic anatomy of a lacustrine system under the influence of microbial processes

Saulo Pedrinha Guimarães | Guilherme Pederneiras Raja Gabaglia | Ricardo Lykawka | Dimas Dias Brito

resumo

As grandes descobertas de petróleo ocorridas nos últimos anos na província do pré-sal brasileiro levaram à necessidade de estudos em afloramentos de sistemas sedimentares análogos às rochas-reservatório presentes no Brasil. Neste âmbito, a Bacia de Salta na Argentina, por meio da Formação Yacoraite, assume papel de alto destaque, pois apresenta características análogas às dos depósitos sedimentares do pré-sal. Localizada no noroeste argentino, a Bacia de Salta evoluiu a partir de um contexto tectônico de um rifte intracontinental durante o Cretáceo e início do Paleógeno, formando sub-bacias que foram preenchidas pelos sedimentos dos subgrupos Pirgua (sin-rifte), Balbuena e Santa Bárbara (ambos depósitos do tipo sag). De forma particular, o desenvolvimento do sag na Sub-bacia de Metán-Alemania durante o Maastrichtiano (Formação Yacoraite) permitiu a deposição de rochas carbonáticas em um ambiente predominantemente lacustre, onde fatores climáticos

– associados aos ciclos de Milankovitch – desempenharam forte controle. As fácies carbonáticas presentes no intervalo estudado são constituídas principalmente por estromatólitos e *grainstones* oolíticos, que estão relacionados a períodos de clima seco em que a progressiva diminuição da lâmina d'água do lago ocorreu de maneira expressiva. Com a aplicação das técnicas da estratigrafia de alta resolução, as sequências elementares individualizadas foram hierarquizadas em sequências de média e baixa frequência e correlacionadas ao longo de dezenas de quilômetros na bacia. Assim, a estratigrafia de alta resolução aplicada em sucessões carbonáticas lacustres permitiu melhor compreensão da evolução do estaqueamento sedimentar de seus depósitos e torna-se uma ferramenta importante de previsibilidade faciológica. Trata-se, portanto, de uma metodologia com aplicabilidade na indústria do petróleo, em que rochas de mesma natureza constituem reservatórios produtores.

Palavras-chave: depósitos lacustres | carbonatos | estromatólitos | estratigrafia de alta resolução

abstract

The large oil discoveries of the past few years in the Brazilian “pre-salt” province have led to the necessity of conducting studies into the outcrops of sedimentary systems analogous to the reservoir rocks present in Brazil. In this context, the Salta Basin and Yacoraite Formation have a remarkable importance because of the similarities to the “pre-salt” sedimentary deposits. Located in northwestern Argentina, the Salta Basin evolved from an intracontinental tectonic rift context during the Cretaceous and early Paleogene periods, forming sub-basins that were filled by sediments from the Pirgua (syn-rift), Balbuena and Santa Barbara (both sag deposits) Sub-groups. In particular, the sag development in Metán-Alemania Sub-basin during the Maastrichtian (Yacoraite Formation) allowed the deposition of carbonate rocks in a typical lacustrine environment, where climatic factors – associated with Milankovitch cycles – played strong controls. The carbonate facies present in the studied area consist mainly of stromatolites and oolitic grainstones, which are related to periods of dry weather during a progressive decrease of lake-water depth. By applying high-resolution stratigraphy techniques, individualized elementary sequences were ranked into medium and low frequency sequences and correlated over tens of kilometers in the basin. Thus, high-resolution stratigraphy applied to lacustrine carbonate successions allowed a better understanding of their depositional evolution and stacking pattern, becoming an important tool for predictability and facies mapping. It is, therefore, a methodology with applicability in the oil industry, where rocks of the same nature constitute productive reservoirs.

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

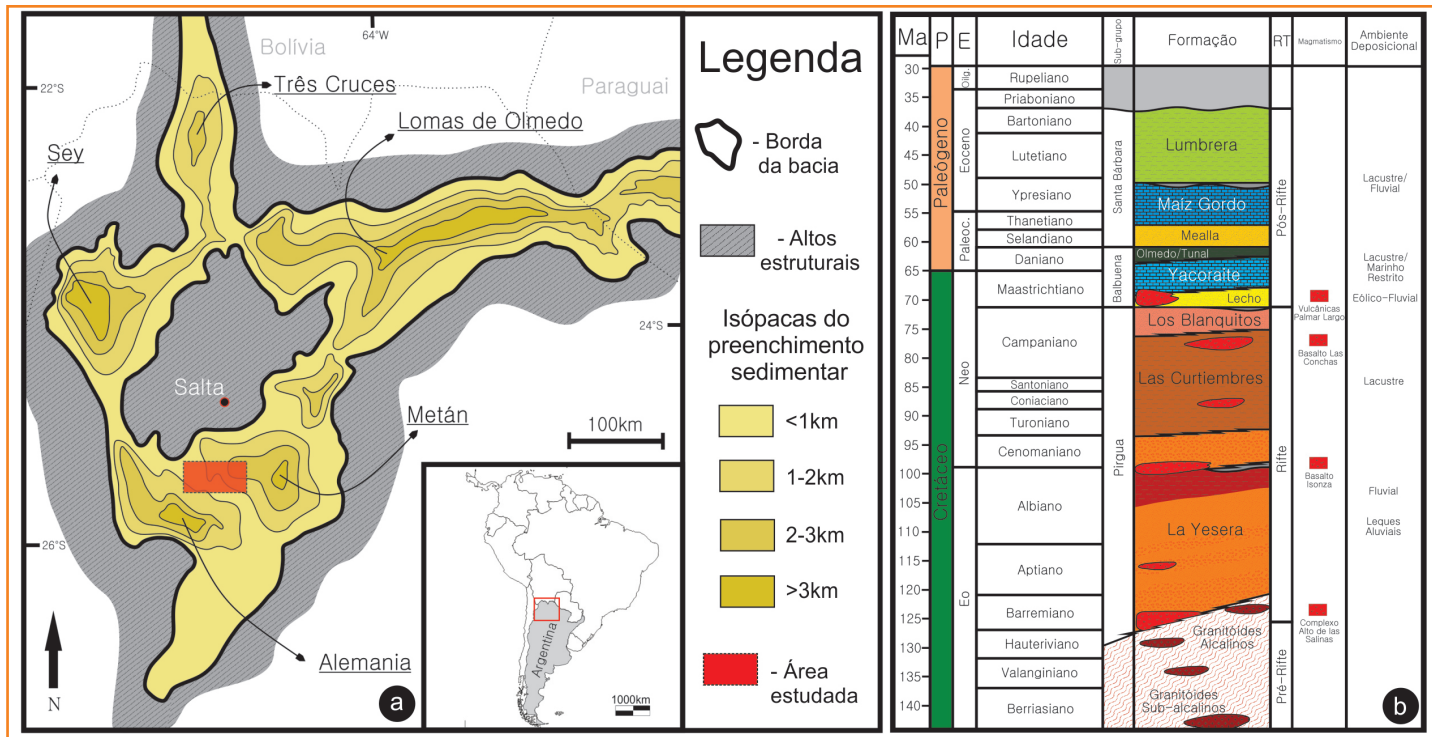
Keywords: lacustrine deposits | carbonates | stromatolites | stratigraphy | high resolution

introdução

A Bacia de Salta, com depósitos sedimentares do Grupo Salta (Turner, 1959), cobre uma área de aproximadamente 150.000km² que se estende desde o noroeste da Argentina até a parte sul da Bolívia e oeste do Paraguai (Del Papa e Salfity, 1999). Grande parte da bacia encontra-se em território argentino e inclui as províncias de Jujuy, Salta e Tucumán. O Grupo Salta se desenvolveu a partir do Cretáceo em uma bacia do tipo rifte intracontinental, síncrono à ruptura do Gondwana (Hernández *et al.*, 1999); sua evolução foi encerrada no final do Eoceno, associada ao início da Orogênese Andina (Hernández e Echavarría, 2009). Feições estruturais dividem a Bacia de Salta em quatro principais sub-bacias: Tres Cruces – ao norte; Lomas de Olmedo – a leste; Sey – a oeste; e Metán-Alemania – ao sul, esta última sub-bacia alvo do presente estudo (fig. 1a).

A coluna estratigráfica da Bacia de Salta é apresentada na figura 1b. Salfity e Marquillas (1994) descreveram sua evolução com base na análise de seu empilhamento sedimentar e dos processos estruturais atuantes na época da deposição. Esses autores reconheceram duas categorias de depósitos na bacia: depósitos sin-rifte e pós-rifte. Os primeiros correspondem aos depósitos do Sub-Grupo Pirgua; quando de sua acumulação, a atividade de falhas desempenhou importante papel na geração de espaço para a acumulação de sedimentos. Os depósitos pós-rifte são representados pelos depósitos dos sub-grupos Balbuena e Santa Bárbara; tais sedimentos foram acumulados numa fase em que a subsidência termal foi o principal mecanismo de controle da acomodação (depósitos do tipo sag).

As vultosas descobertas de petróleo nas bacias de Santos e Campos, na província denominada pré-sal, fizeram com que a Petrobras optasse por investir mais amplamente – dentro e fora do país – em pesquisas direcionadas ao entendimento genético de análogos estratigráficos aflorantes com grande continuidade de exposição, lateral e vertical. Um dos focos deste esforço tem sido o levantamento de insumos estatísticos e geológico-arquiteturais em alta definição necessários a melhor caracterização das rochas-reservatórios das jazidas brasileiras, visando a sua modelagem geológica e oferecendo suporte aos projetos de desenvolvimento da produção dos respectivos campos de petróleo.



Neste âmbito, a Bacia de Salta com a Formação Yacoraita tem papel de alto destaque, pois esta unidade apresenta diversas características semelhantes às da seção pré-sal, e o aprimoramento do conhecimento de sua geologia é de grande importância para ser aplicado na obtenção de melhor entendimento dos reservatórios produtores no Brasil.

O presente trabalho faz uso dos principais resultados e conceitos elaborados pela equipe do Programa de Capacitação em Estratigrafia de Alta Resolução da Petrobras (PCEAR) na região (Bento Freire *et al.*, 2011; Raja Gabaglia *et al.*, 2011; Bento Freire, 2012; Lykawka *et al.*, 2012; Terra *et al.*, 2012; Gomes, 2013) e tem como objetivo o estudo das rochas carbonáticas, mistas e siliciclásticas do intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraita na Sub-bacia de Metán-Alemania, visando à compreensão de seu arcabouço genético e deposicional sob a ótica da estratigrafia de alta resolução.

Tendo por base dados bibliográficos e de campo – em que se fez uso de ferramentas tais como descrição de afloramentos, confecção e correlação de perfis sedimentológicos e perfis de raios gama, além de análises petrográficas realizadas por meio do estudo de lâminas delgadas –, foram formuladas hipóteses e desenvolvidos os

seguintes tópicos de trabalho como os principais objetivos do estudo:

1. reconhecimento de indicadores paleoambientais (fósseis e isótopos) e de fácies sedimentares;
2. conceptualização de um modelo de variação do nível de base vinculado ao nível do lago e este às variações climáticas que condicionam o suprimento sedimentar terrígeno externo ao sistema e, por conseguinte, a produção carbonática;
3. definição de sucessões elementares de fácies (menor ciclo macroscopicamente reconhecível e regionalmente relevante, denominados sequências elementares), conforme os conceitos de padrão de empilhamento e de definição de superfícies envoltórias (ou limitantes);
4. estabelecimento de hipóteses sobre a origem da ciclicidade – consistente sobre tão vasta área – segundo a lógica de que apenas um sistema oscilatório de baixa dissipação de energia poderia ter governado mudanças no ambiente de sedimentação com tal sincronismo;

Figura 1

(a) Mapa e localização da Bacia de Salta e de suas sub-bacias (Salfity e Marquillas, 1994). (b) coluna estratigráfica do Grupo Salta. P = Período, E = Época e RT = Regime Tectônico. Os campos em cinza representam hiatus deposicionais. A partir de Marquillas *et al.* (2003) e Hernández *et al.* (1999).

Figure 1

(a) Map and location of the Salta Basin and its sub-basins (Salfity and Marquillas, 1994); (b) Salta Group Stratigraphic column. P = Period, E = Epoch and RT = Tectonic Regime. Gray fields represent depositional hiatus. From Marquillas *et al.* (2003) and Hernández *et al.* (1999).

5. com base nos princípios da cicloestratigrafia e de controle alogênico na sedimentação, propõem-se hipóteses temporais que vinculam o fator controlador das sequências identificadas aos Ciclos de Milankovitch e suas flutuações climáticas associadas.

Formação Yacoraite: dinâmica e controles deposicionais

A Formação Yacoraite na Sub-bacia de Metán-Alemania apresenta aspectos particulares em relação às sub-bacias de Lomas de Olmedo e Tres Cruces. Enquanto nas sub-bacias mais ao norte as evidências de influência marinha em sua deposição estão mais presentes, na sub-bacia de Metán-Alemania elas são mais escassas.

Especificamente em Tres Cruces, foi detectada nesta unidade estratigráfica a presença de amonoides (Steinmann, 1906 *apud* Cónsole e Gonella, 2009) e de foraminíferos disseminados (Méndez e Viviers, 1973), além de dinoflagelados. Tal associação fossilífera aponta uma efetiva influência marinha naquela sub-bacia à época da deposição dos sedimentos da Formação Yacoraite. Já em Metán-Alemania, não foram encontrados registros de fósseis de amonoides, tampouco de foraminíferos.

Fósseis de peixes marinhos da espécie *Coleodustoncoensis*, encontrados no intervalo paleocênico da Formação Yacoraite na Sub-bacia de Metán-Alemania (Benedetto e Sánchez, 1972), poderiam estar relacionados a ambiente deposicional com influência marinha. Todavia, a ocorrência desses bioelementos é rara, sendo encontrados em associação com fósseis tipicamente de água doce, como carófitas (Musachio, 1972), *Ilyocypris* (Méndez e Viviers, 1973; Carmo *et al.*, 2004) e *Azolla* cretácea (Quattrocchio, 2006), principalmente nas fácies pelíticas siliciclásticas do intervalo.

Os dados de isótopos sugerem, para a Sub-bacia de Metán-Alemania, a restrição na comunicação direta com o mar em tempos da deposição de sedimentos da Formação Yacoraite. Sial *et al.* (2001) analisaram nove amostras desta unidade na região do Dique Cabra Corral (Sub-bacia de Metán-Alemania) e constataram variações de 0,7140 a 0,7156 nos valores da razão isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; isto confirma que os carbonatos depositados

naquela época estiveram associados a um ambiente lacustre, sob forte influência continental.

Com base nas evidências encontradas, é possível interpretar que, embora as sub-bacias situadas mais ao norte tivessem comunicação com o mar, os carbonatos da Formação Yacoraite depositados na Sub-bacia de Metán-Alemania, ao sul, teriam tido origem predominantemente lacustre. Tal concepção dirigiu o estudo da deposição de suas rochas por meio da análise dos principais fatores que controlam a sedimentação neste tipo de ambiente.

Lagos são sistemas que possuem menor volume de água e sedimentos quando comparados aos sistemas marinhos, sendo, portanto, muito mais sensíveis ao clima (Bohacs *et al.*, 2000). Períodos mais chuvosos (úmidos) e mais secos (áridos) influenciam diretamente o nível de água do lago, a taxa de sedimentação e, por conseguinte, o espaço disponível para a acumulação de sedimentos.

O aporte de sedimentos siliciclásticos aos lagos é diretamente influenciado pelo clima. Em períodos de maior precipitação pluviométrica, com chegada de água por meio de rios, o suprimento sedimentar que vem de fora da bacia aumenta, sendo diretamente proporcional ao volume aquoso que entra no lago e à subida do seu nível, sendo este o grande responsável pelo aumento da acomodação e pela expansão de suas bordas. Por outro lado, os períodos de menor aporte de sedimentos à bacia correspondem às épocas mais secas, com altas taxas de evaporação, quando os rios transportam uma pequena carga de sedimentos ou simplesmente secam. Durante esta fase (seca), as bordas do lago retraem-se, expondo áreas antes recobertas pela água, e o nível do lago tende a diminuir, o que reduz a acomodação (Bohacs *et al.*, 2000).

A produção carbonática também é controlada pelo clima. Nos períodos mais áridos, quando as águas se tornam limpas devido à menor concentração de argilominerais que vem de fora da bacia, a produção carbonática alcança seu auge, e a acomodação sofre uma progressiva diminuição tanto pela queda no nível do lago (taxa de evaporação maior que a taxa de precipitação), quanto pela sedimentação carbonática. Os depósitos carbonáticos tendem a ocupar, de forma mais acelerada, o espaço disponível, tanto vertical quanto horizontalmente (Bohacs *et al.*, 2000, fig. 2).

Considerando-se uma taxa de subsidência regular e praticamente contínua, conforme relatado para bacias do tipo *sag* (Prosser, 1993; Armitage e Allen, 2010), o clima se torna o fator preponderante na dinâmica sedimentar da Formação Yacoraite.

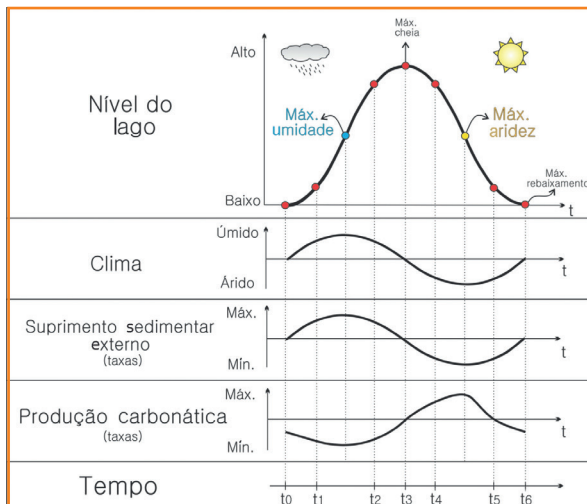


Figura 2 – Quadro resumo das principais variáveis que controlam a sedimentação lacustre em um ciclo completo de variação climática. Destaque para a relação direta entre o clima, o suprimento sedimentar que vem de fora da bacia e o nível do lago. A taxa de variação do nível do lago é máxima positiva quando o clima atinge a máxima umidade, e máxima negativa quando atinge a máxima aridez. A produção carbonática atinge o seu auge no período de máxima aridez e tem sua pujança reduzida pela progressiva redução da acomodação dada pela contínua retração do lago até o ponto de seu máximo rebaixamento, podendo, eventualmente, chegar a ausência completa do corpo d'água. A partir de Bento Freire (2012).

Figure 2 – Summary table showing the main variables that control lake sedimentation in a complete cycle of climate change. It highlights the direct relationships among climate, outside basin sediment supply and the lake level. The lake-level change rate is maximum positive when the weather reaches the maximum humidity and maximum negative when it reaches the maximum aridity. The carbonate production reaches its peak in the period of maximum of aridity, but has its vigorous growth reduced by the progressive reduction of accommodation given by the continuous retraction of the lake to the point of its minimum level, possibly reaching the complete absence of water body. From Bento Freire (2012).

fácies sedimentares

As rochas observadas ao longo do intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraite foram subdivididas em nove fácies sedimentares, sendo duas fácies siliciclásticas, cinco fácies carbonáticas, uma fácies mista e uma fácies vulcânica.

A tabela 1 contém as principais características e uma síntese do processo deposicional atuante durante a deposição das fácies sedimentares identificadas.

A interpretação das fácies observadas permitiu a inferência dos principais processos sedimentares envolvidos em sua formação. A partir daí, foi possível propor um modelo que relaciona sua ocorrência à lâmina d'água, às condições de energia e, conseqüentemente, à sua posição em relação à borda do lago.

De maneira geral, as fácies carbonáticas ETRc, LMT, ETRd e GST devem ter se desenvolvido em regiões mais próximas à borda do lago e com menores lâminas d'água (maior luminosidade), estando relacionadas a períodos climáticos mais áridos, quando a entrada de sedimentos vindos de fora da bacia era reduzida, deixando a água do lago mais límpida. Estes fatores favoreceram a produção carbonática.

Neste espectro de fácies de borda de lago, as espessuras reduzidas e as recorrentes feições de exposição subaérea, associadas às fácies ETRc e LMT, indicam sua origem relacionada a condições extremamente rasas. Por outro lado, com espessuras bem desenvolvidas, a fácies ETRd sugere sedimentação em lâminas d'água relativamente maiores. A ocorrência de estratificações cruzadas tangenciais e de baixo ângulo e topo ondulado na fácies GST corresponde a processos sedimentares de alta e moderada energia, sugerindo que sua sedimentação ocorreu em posições de profundidade rasa, porém onde o lago fosse afetado pela ação de correntes e ondas.

A fácies ARNh, mais rara, ocorre associada às fácies carbonáticas. Esta associação e a dominância de grãos siliciclásticos nesta fácies indicam que este material é proveniente da borda (ou de áreas continentais adjacentes) de um lago retraído, possivelmente sendo transportado por trajetórias mais curtas.

Fácies			Caracterização	Processo principal
Siliciclásticas	Fs	Argilitos a siltitos laminados ou maciços	Camadas decimétricas (10cm-50cm). Estrutura interna maciça a laminada. Coloração cinza-escuro a claro ou esverdeado.	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia
	ARN	Arenitos finos a médios com estratificação cruzada truncada e de baixo ângulo	Camadas decimétricas (5cm-30cm) com geometria tabular. Estratificações cruzadas truncadas e de baixo ângulo. Composição micácea e quartzosa variando de areia fina a média.	Fluxo trativo subaquoso
Carbonáticas	Fcs	Mudstones a Wackestones com grãos terrígenos	Camadas decimétricas (10cm-60cm). Estrutura interna laminada. Grãos compostos por bioclastos, principalmente ostracodes, e subordinadamente por ooides e peloides. Presença constante de grãos siliciclásticos.	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia
	GST	Grainstones a Packstones oolíticos com bioclóstos	Camadas decimétricas (10cm-60cm) predominantemente tabulares e lenticulares. Comumente apresenta topo ondulado. Constituída essencialmente por ooides. Granulometria dominante: tamanho areia média a grossa.	Fluxo trativo subaquoso de alta a moderada energia associados a correntes e ondas
	ETRd	Estromatólitos “dômicos”	Camadas centimétricas a decimétricas (5cm-70cm) e eventualmente em camadas métricas (1m-1,5m). Geometria dômica. Apresenta laminação interna. Aglutina desde lama carbonática até grãos de ooides e bioclastos. Recorrentes feições de exposição.	Bioconstrutivo [organomineralização bioinduzida, (Dupraz <i>et al.</i> , 2009)] e <i>trapping and binding</i> (BLACK, 1933)
	ETRc	Estromatólitos “colchete”	Camadas centimétricas a decimétricas (1cm-15cm). Geometria em colchete dada pelo exótico encurvamento de seus limites laterais. Apresenta laminação interna. Aglutina desde lama carbonática até grãos de ooides e bioclastos. Recorrentes feições de exposição.	Bioconstrutivo [organomineralização bioinduzida, (Dupraz <i>et al.</i> , 2009)] e <i>trapping and binding</i> (BLACK, 1933)
	LMT	Laminitos	Estrutura interna é laminada plano-paralela. Em raros níveis centimétricos (1cm-2cm) observa-se laminações cruzadas	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia e eventual fluxo trativo subaquoso
Mista	ARNh	Arenito híbrido	Camadas centimétricas a decimétricas (5cm-20cm) de geometria tabular a lenticular, por vezes com marcas onduladas no topo. Apresenta estratificação cruzada de baixo ângulo e estrutura maciça. Constituída predominantemente por quartzo e oóides tamanho areia fina a grossa.	Fluxo trativo subaquoso
Vulcânica	TUF	Tufo vulcânico	Camadas centimétricas a decimétricas (5cm-30cm) com geometria tabular. Textura inequigranular fina com cristaloclastos subédricos de plagioclásio e feldspato não identificado, inseridos numa matriz fina constituída de vidro vulcânico.	Precipitação física

Tabela 1

Principais fácies reconhecidas na área estudada, características e processos sedimentares.

Table 1

Main sedimentary facies recognized in the study area, characteristics and sedimentary processes.

As fácies finas com contribuição siliciclástica (Fs e Fcs) estão localizadas nas porções mais profundas e de menor energia, enquanto as fácies areníticas (ARN) se localizam mais próximas à borda do lago, sendo submetidas ao retrabalhamento por ondas e correntes. Todas estas fácies são relacionadas a períodos mais úmidos em que grande aporte de sedimentos chegou à bacia lacustre.

A figura 3 ilustra o posicionamento paleoambiental das fácies sedimentares identificadas em relação à borda do lago e à lâmina d'água.

estratigrafia de seqüências

O intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraite na área estudada apresenta espessuras que variam entre 115m e 125m. Seu limite basal situa-se no topo dos depósitos flúvio-eólicos da Formação Lecho, e seu limite superior é definido pelo marco regional de argilitos e siltitos avermelhados subjacente ao limite Cretáceo-Paleógeno

(K-T) (Sial *et al.*, 2001; Ferreira *et al.*, 2003; Marquillas *et al.*, 2003, 2007).

seqüências elementares

Sucessões sedimentares que apresentam um arranjo de fácies que corresponda ao menor ciclo reconhecível de uma mudança ambiental regionalmente relevante são chamadas de seqüências elementares (modif. Strasser *et al.*, 1999). O intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraite apresenta um registro estratigráfico construído a partir do empilhamento de seqüências elementares, em que foram definidos quatro tipos principais: três seqüências predominantemente carbonáticas e uma seqüência predominantemente siliciclástica, assim denominadas: seqüência tipo “ETR”, seqüência tipo “G8”, seqüência tipo “colchete” e seqüência siliciclástica. A ocorrência – predominante ou exclusiva – destas seqüências elementares varia conforme o nível estratigráfico observado: a seqüência tipo “ETR” ocorre com maior frequência no intervalo basal da seção estudada; a seqüência tipo “G8” ocorre

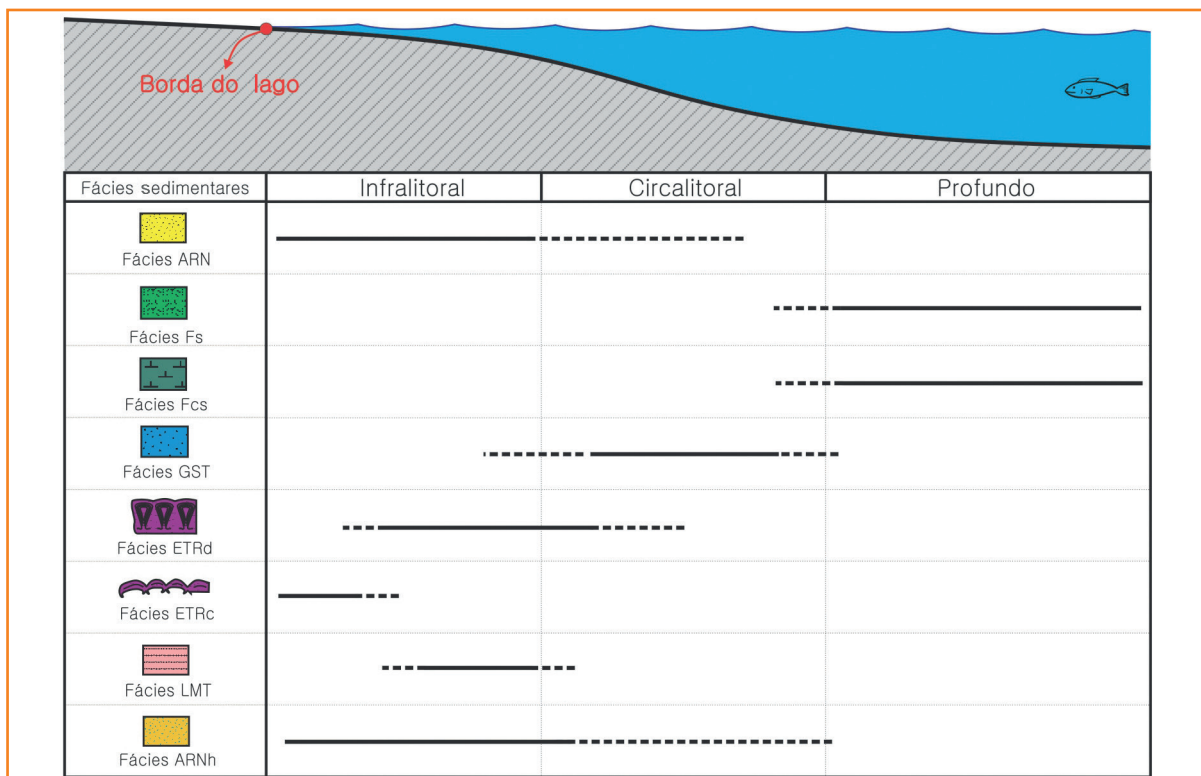


Figura 3 – Posição das fácies sedimentares identificadas em relação à lâmina d'água e à borda do lago.

Figure 3 – Position of sedimentary facies identified relative to water depth and lake margin.

apenas no intervalo central; já as sequências tipo “colchete” e siliciclástica ocorrem exclusivamente no intervalo superior.

Os empilhamentos de fácies observados nas sequências elementares identificadas podem ser associados a curvas ideais de variações completas do nível do lago para uma posição mais central em seu corpo d'água (fig. 4).

Dois períodos principais no regime hidrológico e climático são definidos nestas curvas. No período úmido (chuvoso), a maior taxa de precipitação pluviométrica faz com que o nível do lago aumente devido à maior chegada de água por meio de rios; no período árido (seco), a taxa de evaporação é mais elevada e faz com que o nível do lago diminua. Os períodos úmidos e áridos são separados pelos pontos de “máxima cheia” e “máximo rebaixamento”, que correspondem ao momento em que o nível do lago atinge, respectivamente, o seu maior e o seu menor nível.

Dois outros pontos relacionados ao regime climático podem ser identificados na curva de variação do nível do lago: o ponto de “máxima

umidade” é definido pela posição na curva em que o lago tem a maior taxa de subida de seu nível e corresponde ao momento de maior entrada de água e sedimentos no sistema; já o ponto de “máxima aridez” está associado ao momento de maior evaporação do sistema e, conseqüentemente, à maior taxa de descida do nível do lago.

O período úmido da curva de variação do nível do lago está relacionado com as fácies sedimentares finas com contribuição siliciclástica (Fs e Fcs). Neste período, com o aumento da entrada de sedimentos na bacia, a água se torna mais turva, dando lugar a uma deposição de baixa energia com domínio dos processos de decantação abaixo do nível das ondas e distantes das bordas de um lago expandido.

Diferentemente das sequências elementares tipo “ETR” e tipo “G8”, a sequência elementar tipo “colchete” não apresenta o pleno desenvolvimento das fácies finas com contribuição terrígena (fácies Fs e Fcs) relacionadas aos períodos úmidos, dando lugar à deposição da fácies LMT. A menor presença de elementos siliciclásticos, o reduzido desenvolvimento

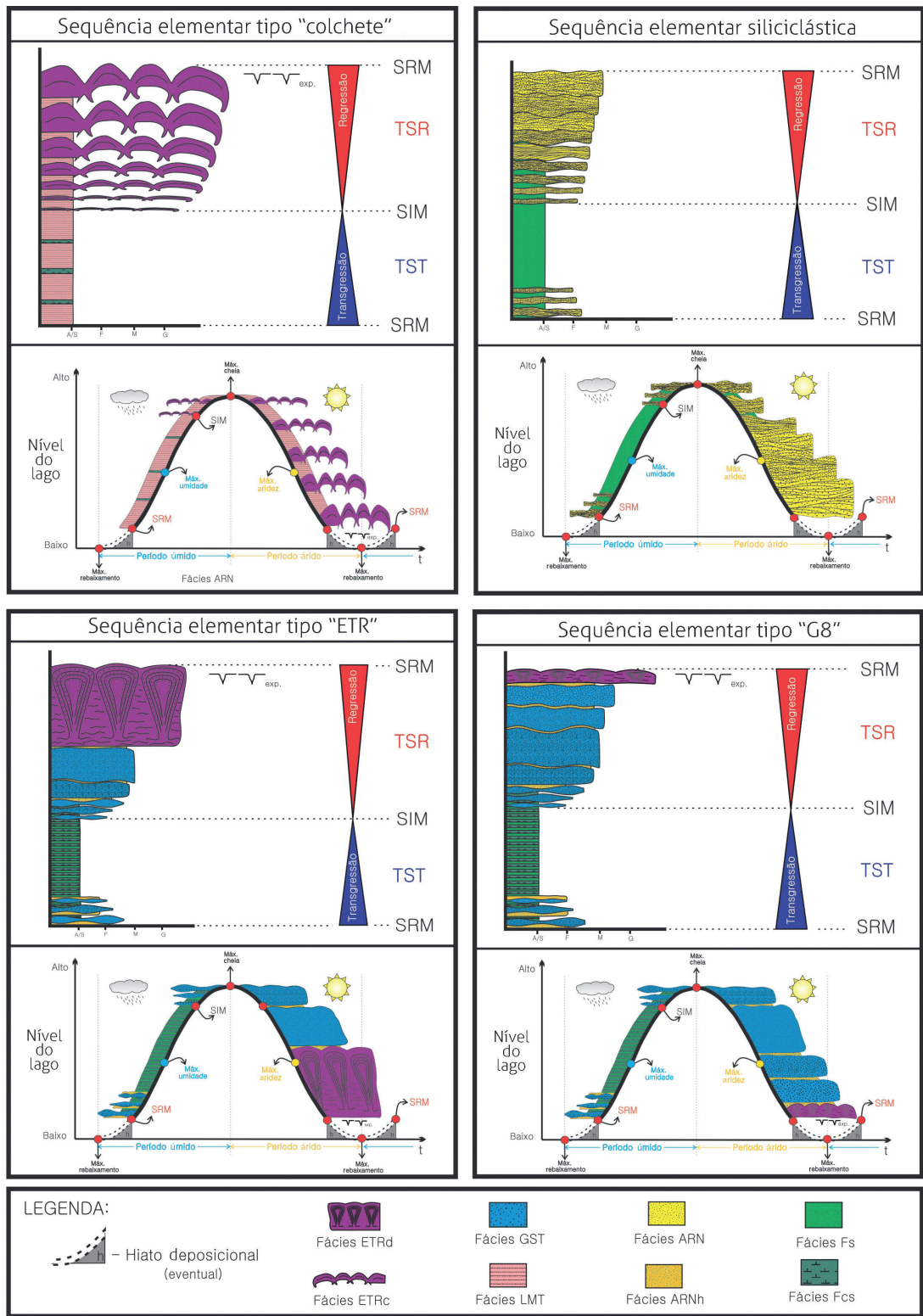


Figura 4 - Sequências elementares: empilhamento de fácies ideal e sua relação com a curva de variação do nível do lago. Destaque para a posição das superfícies de inundação máxima (SIM) e regressão máxima (SRM), bem como os tratos de sistemas transgressivo (TST) e regressivo (TSR).

Figure 4 – Elementary sequences: ideal facies stacking and its relationship with the lake-level variation curve. Highlight is given to the position of the maximum flood (SIM) and maximum regression (SRM) surfaces and transgressive system (TST) and regressive system (TSR) tracts.

vertical e maior espriamento lateral das colônias microbianas (revelando-se sob forma semelhante à de grandes “colchetes” em seções bidimensionais) e as recorrentes feições de exposição sugerem que, durante a deposição desta sequência, o clima era predominantemente árido, com reduzida entrada de água e sedimentos no lago, o que manteve o seu nível baixo (baixa acomodação; Bento Freire, 2012).

As fácies carbonáticas (ETRD, ETRC e GST) estão relacionadas ao período árido, em que a entrada de sedimentos no lago é muito reduzida, deixando o lago límpido e ativando a produção carbonática. O início deste período é marcado pelo ponto de maior acomodação, que gradativamente é consumido tanto pelas elevadas taxas de evaporação, que diminuem o nível do lago, quanto pela sedimentação carbonática. Eventualmente, sobretudo no caso da fácies ETRC, a acomodação é totalmente consumida, levando à formação de feições de exposição subaérea, correspondendo a hiatos deposicionais no registro geológico.

Ao contrário das sequências elementares predominantemente carbonáticas, a sequência elementar tipo siliciclástica não apresenta o pleno desenvolvimento das fácies carbonáticas relacionadas aos períodos áridos, dando lugar à deposição da fácies ARN. O predomínio de elementos siliciclásticos indica que durante a deposição desta sequência havia entrada significativa de água e sedimentos no lago, tornando suas águas mais concentradas em constituintes terrígenos e em condições ambientais que propiciaram a redução drástica da produção carbonática.

Do ponto de vista da estratigrafia de sequências, podem se identificar duas superfícies estratigráficas nas sequências elementares identificadas e relacioná-las à curva de variação do nível do lago. A “superfície de inundação máxima” (SIM) marca o instante em que o lago atingiu a sua máxima expansão, isto é, a posição em que a sua borda alcançou o ponto mais distante de seu centro. A SIM marca uma mudança no regime de sedimentação e corresponde ao instante a partir do qual a taxa de sedimentação suplanta a taxa de criação de acomodação. A partir desta superfície, o padrão de empilhamento de fácies passa a ser progradacional, em que fácies proximais em relação à borda do lago são observadas sobre fácies distais – o que caracteriza o início da regressão da linha de costa (ou borda do lago) e progressiva diminuição da lâmina d’água –, configurando o trato de sistemas regressivo (TSR).

A segunda superfície estratigráfica importante que pode ser identificada é a “superfície de regressão máxima” (SRM). Esta superfície marca o instante no registro geológico em que o lago atingiu a sua máxima retração, isto é, a posição em que sua borda alcançou o ponto mais próximo de seu centro. A SRM marca uma nova mudança no regime de sedimentação e corresponde ao instante a partir do qual a taxa de criação de acomodação suplanta a taxa de sedimentação, e o padrão de empilhamento de fácies passa a ser retrogradacional, quando fácies distais em relação à borda do lago são observadas sobre fácies proximais – o que caracteriza o início da transgressão da linha de costa (ou borda do lago) e progressivo aumento da lâmina d’água –, configurando o trato de sistemas transgressivo (TST).

No presente estudo, as sequências elementares são delimitadas pelas superfícies de regressão máxima (SRM). Estas sequências correspondem a um ciclo completo de transgressão e regressão, e equivalem às sequências do tipo T-R definidas por Embry e Johannessen (1993).

As posições das superfícies estratigráficas, dos tratos de sistemas identificados e do empilhamento faciológico ideal em relação à curva de variação do nível do lago para as sequências elementares identificadas estão representadas na figura 4.

sequências em diferentes escalas

A análise do conjunto das sequências elementares identificadas ao longo da área estudada (fig. 1) revela que estas estão agrupadas em intervalos que se alternam gradual ou abruptamente. No entanto, a mudança no padrão de empilhamento das sequências elementares sempre resulta na definição de uma superfície estratigráfica de maior importância. Um padrão hierarquizado – físico e temporal – se impõe à gênese dos diversos agrupamentos, apontando a existência de tratos e sequências de frequências inferiores às elementares. Assim, as sequências elementares, consideradas de mais alta frequência, se agrupam em sequências de média frequência que apresentam espessuras que variam entre 4m e 19m, e as sequências de média frequência se agrupam em sequências de baixa frequência com espessuras que variam entre 68m e 77m (fig. 5). A nomenclatura utilizada na hierarquização das sequências no presente estudo é relativa, e, a priori, nenhum valor absoluto de

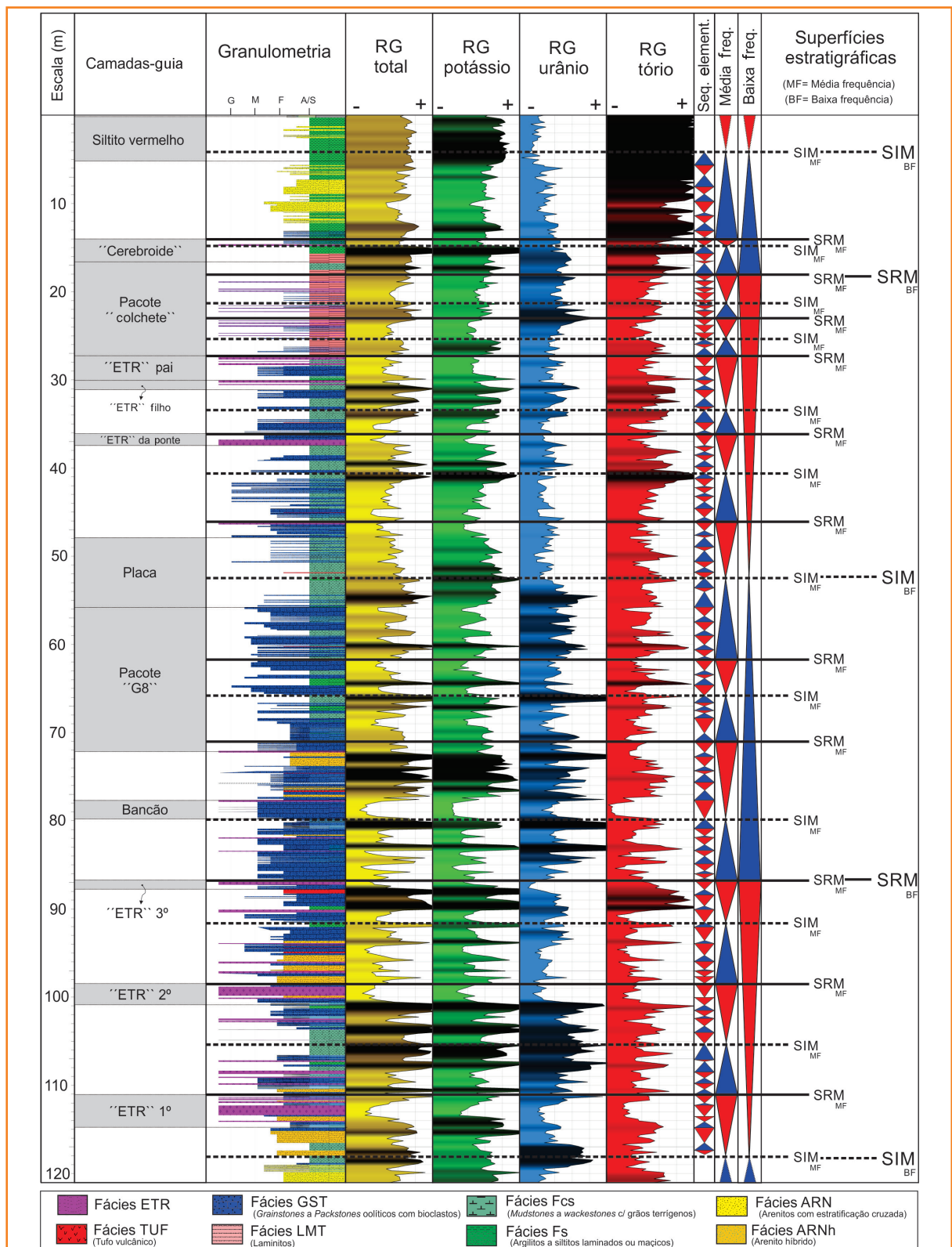


Figura 5 - Padrão hierarquizado das seqüências identificadas: seqüências elementares agrupam-se em seqüências de média frequência que foram agrupadas em seqüências de baixa frequência – Afloramento Ponte.

Figure 5 – Hierarchical pattern of identified sequences: elementary sequences are grouped into medium-frequency sequences that were grouped into low-frequency sequences – Outcrop Bridge.

tempo é atribuído a elas. A evolução faciológica das seqüências em cada nível hierárquico indica que as variações do nível do lago, em diferentes escalas de tempo, desempenharam papel fundamental em suas formações e podem explicar os padrões de empilhamento observados.

Desta forma, as seqüências de média e baixa frequência foram definidas segundo a mesma lógica genética das seqüências elementares. No entanto, aqui, a partir da análise dos padrões de empilhamento em *thickening-upward* ou *thinning-upward* dos tratos de sistemas transgressivos das seqüências elementares (para a definição das seqüências de média frequência) e, posteriormente, a mesma análise é feita acerca dos padrões de empilhamento das seqüências de média frequência (para a definição das seqüências de baixa frequência).

correlação estratigráfica

Foram construídas duas seções estratigráficas integrando os perfis sedimentológicos e de raios gama, uma na direção W-E e outra na direção aproximada NNE-SSW (figs. 6 e 7). Estas duas seções demonstram a inequívoca rastreabilidade, por dezenas de quilômetros, das seqüências identificadas ao longo de toda a área elencada para a análise.

A presença de tufo vulcânicos (fácies TUF) nos perfis sedimentológicos levantados auxilia na validação do arcabouço estratigráfico sequencial proposto até a escala de seqüências elementares e reforça a marcante organização das seqüências identificadas em suas diversas escalas.

As superfícies de inundação e regressão máxima de baixa frequência (SIMBF e SRMBF),

identificadas nos perfis sedimentológicos, foram posicionadas por meio da utilização de Fischer-plots com o objetivo de reforçar a análise de tendência no padrão de empilhamento das seqüências elementares dentro do arcabouço estratigráfico sequencial proposto (fig. 8). Estas superfícies definem grandes mudanças no regime de sedimentação, corroboradas pela análise dos diagramas construídos. A partir das SRMBF ocorre, em todos os perfis levantados, um aumento progressivo da acomodação – relacionado aos tratos de sistemas transgressivos de baixa frequência (TSTBF) –, cujo ápice é atingido na SIMBF. A partir das SIMBF observa-se uma mudança nos padrões de acomodação, em que sua diminuição progressiva – relacionada aos tratos de sistemas regressivos de baixa frequência (TSRBF) – atinge o mínimo na SRMBF.

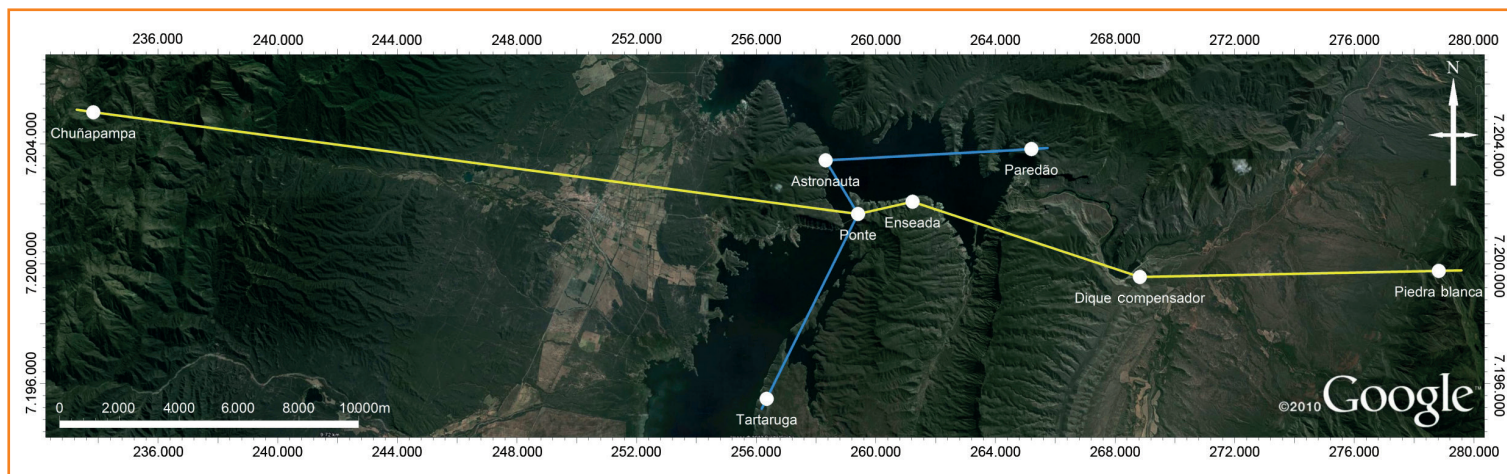
O arcabouço estratigráfico sequencial proposto para o intervalo estudado demonstra uma expressiva organização e regularidade das seqüências individualizadas e indica que o sistema oscilatório que governou as mudanças no ambiente de sedimentação e, por conseguinte, a variação nos padrões de empilhamento faciológico, foi o mesmo em todos os perfis levantados, abrangendo distâncias de dezenas de quilômetros. Tais evidências mostram um forte controle alogênico na formação das seqüências e indicam os ciclos orbitais de Milankovitch – e as flutuações climáticas associadas – como o único sistema oscilatório capaz de produzir tais variações com abrangência regional de forma tão regular e organizada, principalmente em alta frequência.

Figura 6

Mapa de localização das duas seções estratigráficas construídas na área estudada nas direções W-E e aproximadamente NNE-SSW.

Figure 6

Location map of the two stratigraphic sections built in the study area: W-E and approximately NNE-SSW.



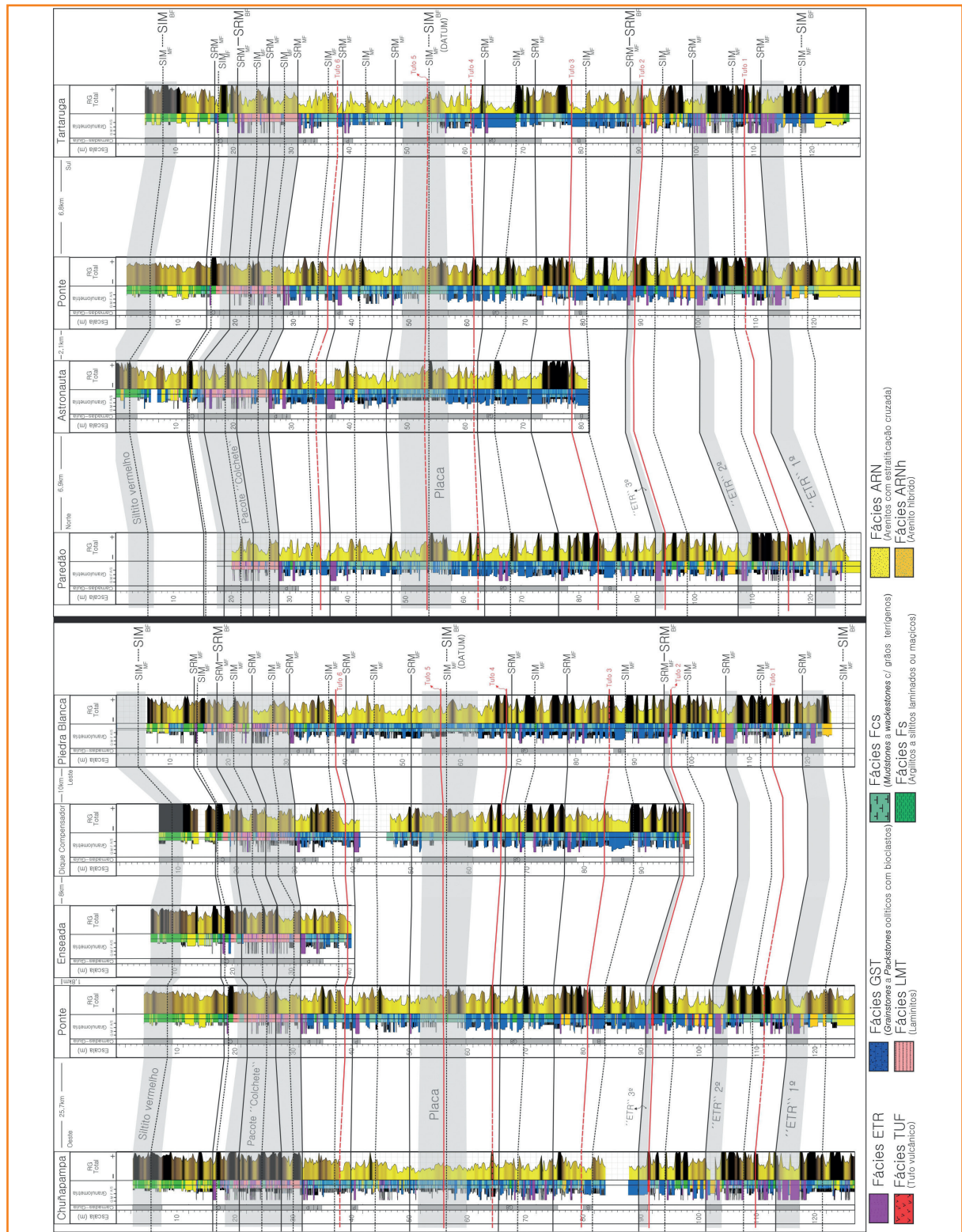


Figura 7 - Seções estratigráficas localizadas na figura 6 revelam expressiva correlação estratigráfica das seqüências identificadas. Destaque para os níveis de tufos vulcânicos observados e inferidos (linhas em vermelho contínuo e tracejado, respectivamente) e camadas-guia (em cor cinza).

Figure 7 – Stratigraphic sections in figure 6 show important stratigraphic correlation of the identified sequences. Highlight for the volcanic tuff observed and inferred levels (solid red and dashed lines, respectively) and guide-layers (in gray).

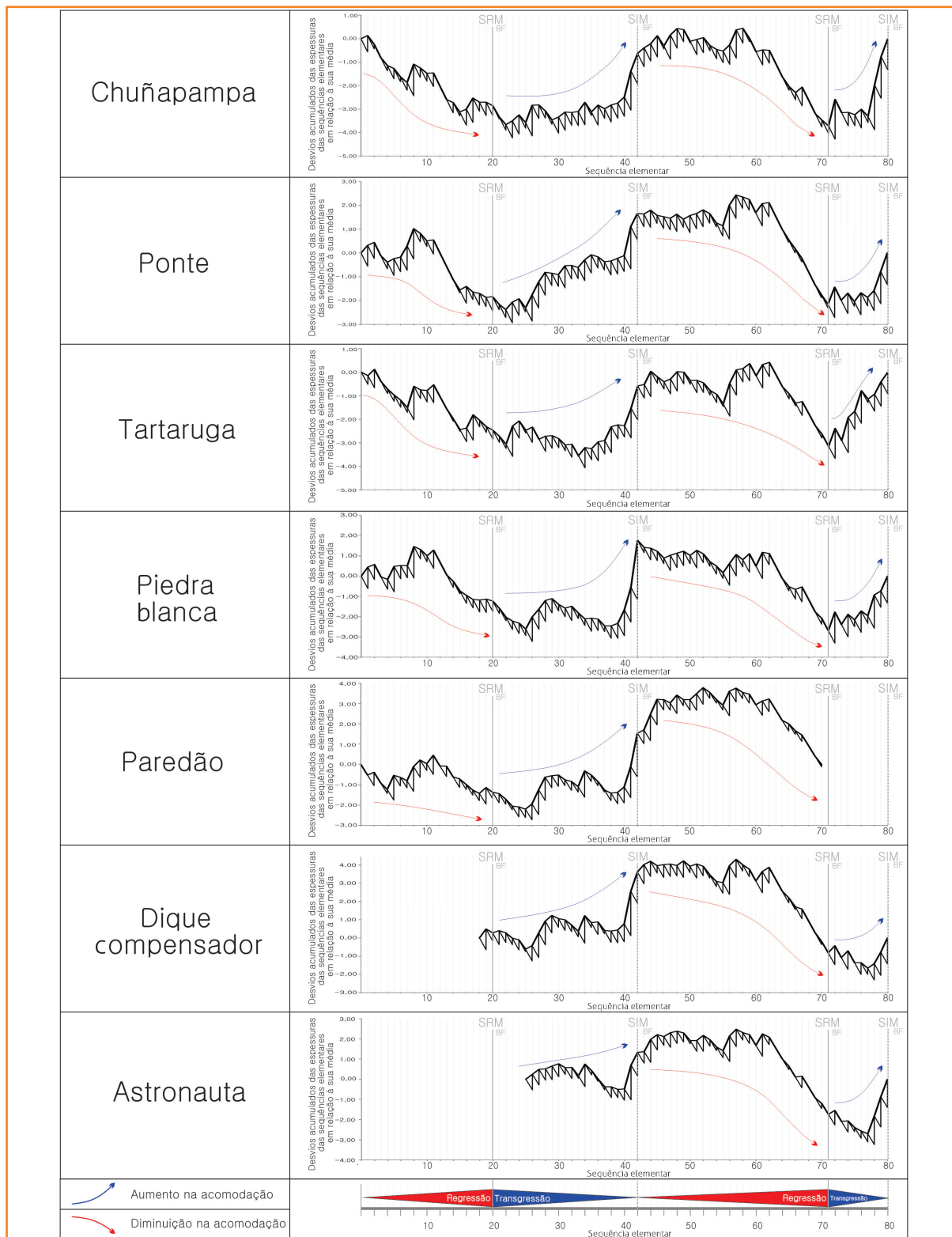


Figura 8 - Fischer plots revelam uma expressiva correlação estratigráfica dos padrões de aumento e diminuição da acomodação. Tratos de sistemas transgressivos e regressivos de baixa frequência coincidem, respectivamente, com o aumento e a diminuição da acomodação.

Figure 8 – Fischer plots reveal an important stratigraphic correlation of increase and decrease in accommodation patterns. Low-frequency transgressive and regressive system tracts coincide, respectively, with increase and decrease in accommodation.

hipóteses de análise temporal para as diversas seqüências

Algumas hipóteses podem ser levantadas a respeito dos fatores controladores e intervalos de tempo associados à formação das seqüências identificadas no intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraite, em que uma seqüência de baixa frequência completa é composta por sete seqüências de média frequência e 51 seqüências elementares.

A primeira hipótese assume que o fator controlador na formação das seqüências elementares estaria ligado a flutuações climáticas associadas aos ciclos orbitais de precessão. Desta forma, o intervalo de tempo médio referente à formação das seqüências de média frequência estaria relacionado aos ciclos de excentricidade curta, e a duração média estimada para a formação de uma seqüência completa de baixa frequência se enquadraria no intervalo de tempo das flutuações orbitais de obliquidade com períodos muito longos (tabela 2).

A segunda hipótese parte da premissa de que os ciclos orbitais de obliquidade – e suas flutuações climáticas associadas – seriam os responsáveis pela formação das seqüências elementares. Por esta hipótese, as seqüências de média frequência se enquadrariam no intervalo de tempo relativo aos ciclos de excentricidade longa, e a duração estimada para a formação de uma seqüência de baixa frequência completa estaria relacionada ao intervalo de tempo associado aos ciclos muito longos de excentricidade (tabela 2).

Dependendo da posição na bacia, as subidas de alta frequência do nível do lago podem não ser capazes de inundar completamente o sistema ou modificar significativamente as condições ambientais. Isto redundaria em um registro incompleto ou na ausência de deposição de seqüências elementares, fenômeno denominado *missed beats* (Goldhammer *et al.*, 1990; 1993). De modo a avaliar o impacto da ocorrência de *missed beats* na interpretação dos fatores controladores na formação de seqüências identificadas, a terceira hipótese leva em consideração um valor arbitrário na ordem de 15% de seqüências elementares ausentes do registro geológico. Desta forma, admite-se que o número total de seqüências elementares contidas em uma seqüência de baixa frequência seria de aproximadamente 58, isto é, sete seqüências elementares foram perdidas. Neste cenário, assumem-se ciclos

de precessão (a) ou obliquidade (b) – e suas variações climáticas associadas – como responsáveis pela formação das seqüências elementares, em que, em ambos os casos, as seqüências de média frequência se enquadrariam nos intervalos de tempo dos ciclos de excentricidade. Ciclos mais longos de obliquidade e excentricidade estariam relacionados às seqüências de baixa frequência quando os controles na formação das seqüências elementares são, respectivamente, ciclos astronômicos de precessão (a) e obliquidade (b) (tabela 2).

Cabe ressaltar que, devido ao intervalo de tempo mais longo associado às formações das seqüências de média e baixa frequência, alguma superposição de sinais tectônicos – como, por exemplo, pequenas variações nas taxas de subsidência – pode acontecer e afetar o registro geológico da periodicidade climática imposta pelos ciclos orbitais de maior duração. Desta forma, são esperadas algumas discrepâncias nos intervalos de tempo associados à deposição das seqüências de média e baixa frequência em relação aos ciclos orbitais.

Para o intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraite, foram individualizadas 79 seqüências elementares completas. Assumindo a hipótese de que a formação destas seqüências foi controlada por variações climáticas associadas a ciclos orbitais de precessão, estima-se que a deposição da seção estudada tenha ocorrido em um intervalo de tempo entre, aproximadamente, 1,5 Ma e 1,8 Ma.

Na hipótese de que o controle climático na formação das seqüências elementares tenha ocorrido através de ciclos orbitais de obliquidade, o intervalo de tempo associado à deposição da seção de estudo teria sido de, aproximadamente, 3,2 Ma a 4,2 Ma. O intervalo de tempo para a deposição da seção estudada teria variado entre, aproximadamente, 1,7 Ma e 2,0 Ma ou 3,7 Ma e 4,9 Ma, quando se assumem, respectivamente, ciclos orbitais de precessão e obliquidade no controle das seqüências elementares em que se consideram 15% de ausência das mesmas no registro geológico.

Não foi considerada a hipótese segundo a qual o fator controlador na formação das seqüências elementares teria ocorrido através de flutuações climáticas associadas aos ciclos orbitais de excentricidade curta e longa. Nesta premissa, o intervalo de tempo relativo à deposição da seção estudada seria de aproximadamente 7,9 Ma (excentricidade curta) ou aproximadamente 31 Ma (excentricidade longa), valores incompatíveis com a duração do intervalo Maastrichtiano (~6 Ma).

Sequência elementar			Sequência de média frequência		Sequência de baixa frequência	
Hipótese	Duração (ka)	Fator controlador (Hipótese assumida)	Duração média estimada (ka)	Fator controlador	Duração média estimada (ka)	Fator controlador
1ª	~19~23	Clima (Precessão)	~138~168	Clima (Excentricidade curta)	~969~1.173	Clima (Obliquidade muito longa)
2ª	~41~54	Clima (Obliquidade)	~298~393	Clima (Excentricidade longa)	~2.091~2.754	Clima (Excentricidade muito longa)

Sequência elementar			Sequência de média frequência		Sequência de baixa frequência	
Hipótese	Duração (ka)	Fator controlador (Hipótese assumida)	Duração média estimada (ka)	Fator controlador	Duração média estimada (ka)	Fator controlador
3ª (a)	~19~23	Clima (Precessão)	~157~190	Clima (Excentricidade curta)	~1.102~1.334	Clima (Obliquidade muito longa)
3ª (b)	~41~54	Clima (Obliquidade)	~340~447	Clima (Excentricidade longa)	~2.378~3.132	Clima (Excentricidade muito longa)

Tabela 2 - Fatores controladores na formação das sequências individualizadas. Períodos associados aos ciclos orbitais obtidos pela literatura (para fins de comparação). Precessão: aproximadamente 19 Ka e 23 Ka; Obliquidade curta: aproximadamente 41 Ka e 54 Ka; Obliquidade muito longa: aproximadamente 1,2 Ma; Excentricidade curta: aproximadamente 95 Ka e 139 Ka; Excentricidade longa: aproximadamente 400 Ka; Excentricidade muito longa: aproximadamente 2,4 Ma. Informações obtidas a partir de Berger (1978); Schwarzacher (1993); Beaufort (1994); Lourens and Hilgen (1997); Shackleton et al. (1999); Wade and Pälike (2004); Abels et al. (2005); Pälike et al. (2006) e Holbourn et al. (2007).

Table 2 – Individualized sequence controlling factors. Astronomic cycle periods are from literature (for comparison). Precession: approximately 19 Ka and 23 Ka; Short obliquity: approximately 41 Ka and 54 Ka; Very long obliquity: approximately 1.2 Ma; Short eccentricity: approximately 95 Ka and 139 Ka; Long eccentricity: approximately 400 Ka; Very long eccentricity = approximately 2.4 Ma. Information obtained from Berger (1978); Schwarzacher (1993); Beaufort (1994); Lourens and Hilgen (1997); Shackleton et al. (1999); Wade and Pälike (2004); Abels et al. (2005); Pälike et al. (2006) and Holbourn et al. (2007).

conclusões

De maneira geral, as fácies carbonáticas (GST, ETRd, LMT e ETRc) se desenvolveram em regiões de lâminas d'água reduzidas que proporcionavam a penetração de maior luminosidade, e a energia elevada das águas causava maior perda de CO₂, fatores estes que estimulavam uma atividade de vida microbial mais pujante. A associação faciológica permite relacionar a sedimentação carbonática a períodos climáticos mais áridos, quando a entrada de sedimentos vindos de fora da bacia era reduzida, preservando a limpidez das águas do lago e levando a maior produção carbonática.

A análise estratigráfica sequencial demonstra que as variações do nível do lago desempenharam papel fundamental na formação das sequências

identificadas. A organização e a regularidade do arcabouço estratigráfico indicam que o sistema oscilatório que governou as mudanças no ambiente de sedimentação foi o mesmo em toda a área de estudo, cobrindo grandes distâncias (até 45km) – o que indica os ciclos de Milankovitch – e as flutuações climáticas associadas – como o único sistema oscilatório capaz de influenciar o regime de sedimentação de forma tão abrangente. Isto conduziu a análises temporais segundo hipóteses que vinculam os fatores controladores na formação das sequências identificadas em diversas escalas aos ciclos orbitais. Este exercício permitiu estabelecer uma amarração geocronológica mais precisa do intervalo estudado usando as bases da cicloestratigrafia.

A região de Salta (Sub-bacia de Metán-Alemanía) se mostrou altamente favorável à análise do arcabouço estratigráfico em alta resolução de

sucessões sedimentares lacustres, uma vez que possibilitou a compreensão – em diversas escalas – da formação, do ordenamento e da distribuição de suas fácies em afloramentos (escala de poço) e, por continuidade física e/ou por correlação, ao longo de uma área comparável a um campo de petróleo.

Portanto, conclui-se que a área pesquisada é altamente recomendável para o desenvolvimento de estudos que visam a uma melhor compreensão do arcabouço genético – sedimentológico e estratigráfico – das sucessões lacustres sob influência microbial segundo a metodologia de análise estratigráfica sequencial em alta resolução. Além disso, os resultados alcançados no estudo do intervalo Maastrichtiano da Formação Yacoraite na Sub-bacia de Metán-Alemania fazem da região uma importante fonte de dados para a aplicação direta aos estudos dos reservatórios produtores de hidrocarbonetos em sequências análogas.

referências bibliográficas

ABELS, H. A.; HILGEN, F. J.; KRIJGSMAN, W.; KRUK, R. W.; RAFFI, I.; TURCO, E.; ZACHARIASSE, W. J. Long-period orbital control on middle Miocene global cooling: integrated stratigraphy and astronomical tuning of the Blue Clay Formation on Malta. **Paleoceanography**, Washington, v. 20, n. 4, Dec. 2005.

ARMITAGE, J. J.; ALLEN, P. A. Cratonic basins and the long-term subsidence history of continental interiors. **Journal of the Geological Society**, Londres, v. 167, n. 1, p. 61-70, Jan. 2010.

BEAUFORT, L. Climatic importance of the modulation of the 100kyr cycle inferred from 16 m.y. long Miocene records. **Paleoceanography**, Washington, v. 9, n. 6, p. 821-834, Dec. 1994.

BENEDETTO, J. L.; SÁNCHEZ, T. El hallazgo de peces Pycnodontiformes (Holostei) en la Formación Yacoraite (Cretácico Superior) de la provincia de Salta. **Ameghiniana**, Buenos Aires, v. 9, n. 1, p. 59-71, 1972.

BENTO FREIRE, E.; RAJA GABAGLIA, G. P.; TERRA, G. J. S.; RODRIGUES, E. B.; LYKAWKA, R. Searching for potential analogues for the pre-salt Santos

Basin, Brazil: high resolution stratigraphic studies of microbialite-bearing successions from Salta Basin, Argentina. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2011, Milan. **Proceedings...** Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2011.

BENTO-FREIRE, E. **Caracterização estratigráfica em alta resolução das sequências calcárias de origem microbiana do intervalo paleocênico da Formação Yacoraite (sequência Balbuena IV) na região de Salta – Argentina**. 2012. 243 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BERGER, A. L. **A simple algorithm to compute long term variations of daily or monthly insolation**. Belgium: Institut d’Astronomie et de Geophysique G. Lemaitre, Université Catholique de Louvain, 1978. 39 p. (Contribution, 18).

BOHACS, K. M.; CARROLL, A. R.; NEAL, J. E.; MANKIEWICZ, P. J. Lake-Basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic-geochemical. In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E.; KELTS, K. (Ed.). **Lake basins through space and time**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, 2000. v. 46, p. 3-37.

CARMO, D. A.; TOMASSI, H. Z.; OLIVEIRA, S. B. S. G. Taxonomia e distribuição estratigráfica dos ostracodes da Formação Quiricó, Grupo Areado (Cretáceo Inferior), Bacia Sanfranciscana, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 2, p. 139-149, jul./ago. 2004.

CÓNSOLE GONELLA, C. A.; CIONE, A. L.; ACEÑO-LAZA, F. G. Registro del teleósteo Gasteroclupea branisai en la Formación Yacoraite (Maastrichtiano-Daniano) en el área de Tres Cruces, Jujuy, Argentina. **Serie Correlación Geológica**, Argentina, v. 25, n. 2, p. 129, 2009.

DEL PAPA, C. E.; SALFITY, J. A. Non-marine Paleogene sequences, Salta Group, Northwest Argentina. **Acta Geológica Hispánica**, Barcelona, v. 34, n. 2-3, p. 105-121, 1999.

DUPRAZ, C.; REID, R. P.; BRAISSANT, O.; DECHO, A. W.; NORMAN, R. S.; VISSCHER, P. T. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats.

Earth-Science Reviews, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 141-162, 2009.

EMBRY, A. F.; JOHANNESSEN, E. P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic successions, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: VORREN, T. O.; BERGSAGER, E.; DDAHL-STAMNES, O. A.; HOLTER, E.; JOHANSEN, B.; LIE, E.; LUND, T. B. (Ed.). **Arctic Geology and Petroleum Potential**. Norway: Elsevier, 1993. p. 121-146. (Norwegian Petroleum Society Special Publication, 2).

FERREIRA, V. P.; SIAL, A. N.; ALONSO, R. N.; TOSELLI, A. J.; ACENOLAZA, F. G.; PARADA, M. A.; ROSSI, J. N. T. ^{13}C minimum in the Late Cretaceous-Paleocene Yacoraite carbonate sequence, NW Argentina. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4., 2003, Salvador. **Short Papers...** Salvador: CBPM/IRD, 2003. p. 345-348.

GOLDHAMMER, R. K.; DUNN, P. A.; HARDIE, L. A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpine Triassic platform carbonates. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 102, n. 5, p. 535-562, Apr. 1990.

GOLDHAMMER, R. K.; LEHMANN, P. J.; DUNN, P. A. The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequences (Lower Ordovician El Paso Gp, west Texas): constraints from outcrop data and stratigraphic modeling. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 63, n. 3, p. 318-359, May 1993.

GOMES, J. P. B. **Simulação de processos deposicionais**: caracterização de dois ciclos de alta frequência da sequência Balbuena IV, Bacia do Noroeste Argentino. 2013. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HERNÁNDEZ, R. M.; DISALVO, A.; BOLL, A.; GÓMEZ-OMIL, R. Estratigrafía secuencial del Grupo Salta, con énfasis en las subcuencas de Metan-Alemania, Noroeste Argentino. In: CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO, 14., 1999, Salta. **Relatórios...** Salta: Universidade Nacional de Salta, 1999. p. 263-283.

HERNÁNDEZ, R. M.; ECHAVARRIA, L. Faja plegada y corrida subandina del noroeste argentino: estratigrafía, geometría y cronología de la deformación. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, Buenos Aires, v. 65, n.1, p. 68-80, 2009.

HOLBOURN, A.; KUHNT, W.; SCHULZ, M.; FLORES, J. A.; ANDERSEN, N. Orbitally-paced climate evolution during the middle Miocene "Monterey" carbon-isotope excursion. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 261, n. 3-4, p. 534-550, Sept. 2007.

LOURENS, L. J.; HILGEN, F. J. Long-periodic variations in the earth's obliquity and their relation to third-order eustatic cycles and late Neogene glaciations. **Quaternary International**, Amsterdam, v. 40, p. 43-52, 1997.

LYKAWKA, R.; RAJA GABAGLIA, G. P.; FREIRE, E. B.; TERRA, G. J. S.; RODRIGUES, E. B.; HERNÁNDEZ, R. Proposta de um modelo estratigráfico hierarquizado para a porção superior do subgrupo Balbuena (Paleoceno) na Sub-Bacia Métan-Alemania (Salta - Argentina): um possível análogo para os depósitos estromatolíticos da seção pré-sal das bacias offshore do sudeste do Brasil. In: REUNIÃO ARGENTINA DE SEDIMENTOLOGIA, 8., 2012, Salta. **Anais...** Argentina: Sociedad Argentina de Sedimentología, 2012.

MARQUILLAS, R. A.; DEL PAPA, C. ; SABINO, I.; HEREDIA, J. Prospección del límite K/T en la cuenca del Noroeste, Argentina. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, Buenos Aires, v. 58, n. 2, p. 271-274, 2003.

MARQUILLAS, R. A.; SABINO, I.; SIAL, A. N.; PAPA, C. D.; FERREIRA, V.; MATTHEWS, S. Carbon and oxygen isotopes of Maastrichtian-Danian shallow marine carbonates: Yacoraite Formation, northwestern Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 23, n. 4, p. 304-320, 2007.

MÉNDEZ, I.; VIVIERS, M. C. Estudio micropaleontológico de sedimentitas de la Formación Yacoraite (Provincias de Salta y Jujuy). In: CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO, 5., 1972, Villa Carlos Paz, Córdoba. **Actas...** Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina, 1973. v. 3, p. 467-470.

MUSACCHIO, E. A. Charophytas de la Formación Yacoraite en Tres Cruces y Yavi Chico, Jujuy,

- Argentina. **Revista de la Asociación Paleontológica Argentina**, Argentina, v. 9, n. 3, p. 223-237, 1972.
- PÄLIKE, H.; FRAZIER, J.; ZACHOS, J. C. Extended orbitally forced palaeoclimatic records from the equatorial Atlantic Ceara Rise. **Quaternary Science Reviews**, Oxford, v. 25, n. 23, p. 3138-3149, Nov. 2006.
- PROSSER, S. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. In: WILLIAMS, G. D.; DOBB, A. (Ed.). **Tectonics and seismic sequence stratigraphy**. London: The Geological Society, 1993. p. 35-66. (Special Publications, 71).
- QUATTROCCHIO, M. Palynology and palaeocommunities of the Paleogene of Argentina. **Revista Brasileira de Paleontologia**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 101-108, Jan./Apr. 2006.
- RAJA GABAGLIA, G. P.; TERRA, G. J. S.; RODRIGUES, E. B.; LYKAWKA, R. Cyclostratigraphy and climatic control on microbial influenced sedimentation (Balbuena Supersequence, Yacoraite Formation, Paleocene, Salta - Argentina). In: IAS MEETING OF SEDIMENTOLOGY, 28., 2011, Zaragoza. **Abstracts...** Krijgslaan: International Association of Sedimentologists, 2011. p. 51.
- SALFITY, J. A.; MARQUILLAS, R. A. Tectonics and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group Basin, Argentina. In: SALFITY, J. A. (Ed.). **Cretaceous Tectonics of the Andes**. Wiesbaden: Springer Vieweg, 1994. p. 266-315. (Earth Evolution Sciences).
- SCHWARZACHER, W. **Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory**. Amsterdam: Elsevier, 1993. 225 p. (Developments in Sedimentology, 52).
- SHACKLETON, N. J.; CROWHURST, S. J.; WEEDON, G. P.; LASKAR, J. Astronomical calibration of Oligocene–Miocene time. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: mathematical, physical and engineering sciences**, London, v. 357, n. 1757, p. 1907-1929, July 1999.
- SIAL, A. N.; FERREIRA, V. P.; TOSELLI, A. J.; PARADA, M. A.; ACENOLAZA, F. G.; PIMENTEL, M. M.; ALONSO, R. N. Carbon and oxygen isotope compositions of some upper Cretaceous-Paleocene sequences in Argentina and Chile. **International Geology Review**, v. 43, n. 10, p. 892-909, 2001.
- STEINMANN, G. **Die Entstehung der Kupfererzlagerstätte von Corocoro und verwandter Vorkommnisse in Bolivia. Sonder-Abdruck aus der Festschrift zum siebzigsten Geburtstage von Harry Rosenbusch**. Stuttgart: Verlag, 1906. p. 335-368.
- STRASSER, A.; PITTET, B.; HILLGARTNER, H.; PASQUIER, J. Depositional sequences in shallow carbonate-dominated sedimentary systems: concepts for a high-resolution analysis. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 128, n. 3-4, p. 201-221, Oct. 1999.
- TERRA, G. J. S.; RODRIGUES, E. B.; FREIRE, E. B.; LYKAWKA, R.; RAJA GABAGLIA, G. P.; HERNÁNDEZ, R.; HERNÁNDEZ, J. I. Balbuena supersequence, Salta Basin, Argentina: a good analog for phanerozoic lacustrine microbialite-bearing reservoirs. In: AAPG HEDBERG CONFERENCE MICROBIAL CARBONATE RESERVOIR CHARACTERIZATION, 2012, Houston. **Abstracts...** Houston: American Association of Petroleum Geologists, 2012.
- TURNER, J. C. M. Estratigrafía del cordón de Escaya y de la Sierra Rinconada (Jujuy). **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, Buenos Aires, v. 13, n. 1, p. 15-39, 1959.
- WADE, B. S.; PÄLIKE, H. Oligocene climate dynamics. **Paleoceanography**, Washington, v. 19, n. 3, p. 1-16, Dec. 2004.

expanded abstract

The Salta Basin contains important sedimentary deposits from the Salta Group (Turner, 1959), that cover an area of approximately 150,000km² extending from the northwestern portion of Argentina to the southern part of Bolivia and western area of Paraguay (Del Papa and Salfity, 1999). A large part of the basin is located in Argentine territory and includes the provinces of Jujuy, Salta and Tucuman. The Salta Group developed from the Cretaceous period in an intracontinental rift basin, synchronous to the Gondwana rupture (Hernández et al., 1999). Evolution terminated during the late Eocene and was associated with the Andean Orogeny (Hernández and Echavarría, 2009). Structural features split the Salta Basin into four main sub-basins: Tres Cruces - to the north; Lomas de Olmedo - to the east; Sey - to the west; and Metán-Alemania to the south, this latter sub-basin is subject of the current study.

Salfity and Marquillas (1994) described the evolution of the Salta Basin from the analysis of its sedimentary stacking pattern and structural processes active at the time of deposition. These authors recognized two categories of deposits in the basin: syn-rift and post-rift deposits (or sag). The first correspond to deposits of the Pirgua Sub-group; when fault activity played an important role in generating space for sediment accumulation. The sedimentary and volcanic rocks of Balbuena and Santa Barbara Sub-groups represent the post-rift deposits; a system accumulated during a phase when thermal subsidence was the main accommodation control mechanism.

The subject of this work is the study of carbonate, mixed and siliciclastic rocks from the Maastrichtian interval of the Yacoraite Formation (sag deposits) in the Metán-Alemania sub-basin, in order to understand their genetic and depositional framework from a high-resolution stratigraphy perspective. A sequential stratigraphic analysis methodology was applied, aiming at the individualization of sedimentary successions in different scales and as a predictive and operational tool for understanding facies heterogeneity in the section studied. Basic tools such as outcrop description, manufacturing and correlation of sedimentological and gamma-ray logs, and thin section petrographic analyses were used.

The Yacoraite Formation in the Metán-Alemania sub-basin reveals particular aspects in relation to the Lomas de Olmedo and Tres Cruces sub-basins. While in the sub-basins further north, the evidence of marine depositional influence is more often present; in the Metán-Alemania sub-basin such evidence is scarce. This concept addresses the analysis of its rock deposition from the main sedimentological controlling factors in such an environment.

The Maastrichtian interval of Yacoraite Formation presents a stratigraphic record built from the stacking of elementary sequences, defined following four main types; three sequences predominantly carbonatic and one sequence predominantly siliciclastic. Herein, they are named: "ETR" sequence type, "G8" sequence type, "Colchete" sequence type and siliciclastic sequence. The facies stacking pattern observed in the elementary sequences identified can be associated with ideal curves of lake-level changes.

The stacking sequences pattern identified throughout the section studied reveals a hierarchical pattern in relation time scale involved in their genesis. Elementary sequences (0,5-2m), considered high frequency, are grouped in medium-frequency sequences that have thicknesses varying from 4m to 19m and medium-frequency are grouped into low-frequency sequences with a thickness varying from 68m to 77m.

The wide lateral traceability of sequences identified throughout the study area is one of the most distinctive features of the Maastrichtian interval of the Yacoraite Formation. The volcanic tuff layers interbedded with the sedimentological deposits are registered in logs and help in the validation of the sequence stratigraphic framework proposed up to the scale of elementary sequences, and reinforce the outstanding organization of the sequences identified in various scales.

Sequence stratigraphic analysis shows that changes in lake levels played a key role in the formation of the identified sequences. The organization and regularity of stratigraphic framework indicate that the oscillatory system that ruled sedimentary changes was the same throughout the study area, covering huge distances (up to 45km). Such evidence indicates a strong allogenic control in the formation of sequences and emphasizes the Milankovitch cycles - and associated climatic fluctuations - as a unique oscillatory system capable

of producing such variations with regional coverage, so regular and organized, especially for high frequency.

The region of Salta (Metán-Alemania sub-basin) remains effective in high-resolution stratigraphic analysis for lacustrine sedimentary successions, because it allowed the understanding - at various scales - of the formation, ordering and facies distribution in outcrops (well scale), and physical continuity and/or correlation, over an oil field's comparable area. Therefore, it is concluded that the studied area is highly recommended for the development of studies that seek a better understanding of lacustrine succession genetic frameworks - sedimentologically and stratigraphically - according to the methodologies of high-resolution sequential stratigraphic analysis.

autores



Saulo Pedrinha Guimarães

E&P Pré-Sal
Competências Técnicas
Reservatórios I
Projetos de Concessão

saulo.pedrinha@petrobras.com.br

Saulo Pedrinha Guimarães é consultor da Petrobras, onde trabalha há sete anos. Geólogo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É Mestre pela Universidade Estadual Paulista (Unesp) na área de geologia regional com ênfase em estratigrafia de alta resolução. Atua em estudos geológicos dos depósitos sedimentares do pré-sal brasileiro desde 2010, dando suporte ao desenvolvimento da produção do Campo de Lula por meio da caracterização e modelagem geológica tridimensional de seus reservatórios.



Guilherme Pederneiras Raja Gabaglia

Recursos Humanos
Universidade Petrobras
Escola de E&P e Desenvolvimento da Produção

guilhermeraja@petrobras.com.br

Guilherme Raja Gabaglia é consultor máster da Petrobras, onde trabalha há 34 anos. Geólogo com PhD em tectônica, estratigrafia e sedimentologia pela Universidade de Montpellier (França). Especialista internacional na área de estratigrafia de alta resolução, com amplo domínio das bases conceituais fundamentais para a modelagem geológica de reservatórios de pré e pós-sal do Brasil. Criador, coordenador e instrutor do Programa de Treinamento de Estratigrafia de Alta Resolução da Petrobras, treinou mais de mil profissionais de E&P (geólogos, geofísicos e engenheiros) com foco na ocorrência estratigráfica e mapeabilidade de rochas-reservatório. Coordenador do Projeto Microbialito - Análise Estratigráfica de Alta Resolução e Sistemas Carbonáticos Microbiais do Neoproterozoico - Formação Salitre, Bahia, Brasil. Também coordenador do projeto Caracterização Estratigráfica de Alta Resolução das Sequências de Calcários de Origem Microbial da Formação Yacoraite, Salta - Argentina. Autor e coautor de vários livros, artigos e apresentações sobre análise estratigráfica em várias escalas, incluindo publicações em congressos nacionais e internacionais, frequentemente usados como referência pela comunidade geocientífica.



Ricardo Lykawka
E&P Corporativo
Reservas e Reservatórios
Geologia de Reservatórios

rlykawka@petrobras.com.br

Ricardo Lykawka é consultor da Petrobras, onde trabalha há nove anos. É graduado em Geologia e Mestre em estratigrafia e sedimentologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Desde sua entrada na Petrobras, trabalha na área de reservatórios, dando suporte ao desenvolvimento da produção, principalmente na modelagem geológica tridimensional dos depósitos carbonáticos aptianos, albianos e oligomiocênicos das bacias de Santos e Campos.



Dimas Dias Brito
Unesp-Rio Claro

dimasdb@rc.unesp.br

Dimas Dias Brito é professor na Universidade Estadual Paulista (Unesp), em Rio Claro (SP), onde ministra cursos de graduação e pós-graduação para alunos de Geologia, Biologia e Ecologia. Geólogo pela UnB (1976), fez mestrado na UFRJ e doutorado na UFRGS. Realizou treinamento na Universidade de Genebra e cumpriu especialização na área de Jornalismo Científico na Unicamp. Integrou por 13 anos o quadro de especialistas do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes) e, desde 1989, atua como professor universitário. Autor de dezenas de artigos e capítulos de livros publicados no Brasil e no exterior, tem atuado na investigação da paleoceanografia do Atlântico Sul primitivo (microfácies carbonáticas e paleoecologia), do Cretáceo continental (micropaleontologia) e de modernos ambientes de sedimentação da costa brasileira (manguezais e lagunas: ecologia de foraminíferos e geobotânica), bem como estudado a sensibilidade destes últimos a derramamentos de petróleo. Tem liderado projetos de pesquisa e orientado alunos de graduação e pós-graduação do Brasil e do exterior. É membro de comitês editoriais de periódicos científicos nacionais e estrangeiros e atua na coordenação do Programa de RH em Geologia e Ciências Ambientais Aplicadas ao Setor de Petróleo & Gás e de Biocombustíveis (PRH-05). É o idealizador e gestor do Centro de Geociências aplicadas ao Petróleo/IGCE-UNESPetro, que inclui um Centro de Geologia Sedimentar (CGS), com seu Núcleo de Petrologia Carbonática (Nopec), e um Centro de Capacitação (CCPet-UNESPetro) voltado para estudantes de graduação e pós-graduação e profissionais da indústria do petróleo.