

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA SEQUÊNCIA SILURIANA DA
BACIA DO PARNAÍBA, NORDESTE DO BRASIL**

Autora:

ERLANNY MARIA ALVES CRUZ

Orientadora:

PROF^a. DR^a. VALÉRIA CENTURION CÓRDOBA

Dissertação nº 166.

Natal, 29 de fevereiro de 2016

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA SEQUÊNCIA SILURIANA DA
BACIA DO PARNAÍBA, NORDESTE DO BRASIL**

Autora:

ERLANNY MARIA ALVES CRUZ

Dissertação apresentada em 29 de fevereiro de 2016, ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN como requisito à obtenção do Título de MESTRE em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em Geodinâmica.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Valéria Centurion Córdoba (Orientadora - PPGG/UFRN)

Prof. Dr. Carlos César Nascimento da Silva (Membro Interno - PPGG/UFRN)

Dr^a. Liliane Rabelo Cruz (Petrobras - Natal)

Natal, 29 de fevereiro de 2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI

Cruz, Erlanny Maria Alves.

Análise estratigráfica da sequência siluriana da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil / Erlanny Maria Alves Cruz. - Natal, 2016. ix, 62f: il.

Orientadora: Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba.

Coorientadora: Profa. Dra. Débora do Carmo Sousa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciência Exatas e da Terra. Programa de PósGraduação em Geodinâmica e Geofísica. Dissertação n.166.

1. Estratigrafia de sequências. 2. Bacia do Parnaíba. 3. Sequência siluriana. I. Córdoba, Valéria Centurion. II. Sousa, Débora do Carmo. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, como não poderia deixar de ser, agradeço a Deus por me acalantar nos momentos difíceis, me dar força interior para superá-los e suprir todas as minhas necessidades.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, e à Chevron Brasil pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho.

À Nilda por sempre me atender da maneira mais polida e doce possível na secretaria do PPGG, e por toda sua colaboração.

À minha orientadora, Valéria Centurion Córdoba, pela confiança, pelas inúmeras sugestões e por ser, para mim, um exemplo de profissional e mulher, e à Débora do Carmo Sousa pela ajuda de sempre.

Aos meus pais, Djalma e Edileusa, avó Maria José e irmã Eirilanny por sempre acreditarem em mim e em minha capacidade. Isso me fortaleceu imensamente durante esses anos de luta. Minha infinita gratidão ao amor incondicional e por todos os sacrifícios que fizeram e ainda fazem por mim.

Aos amigos que a geologia me trouxe. À Carla e Samir, pelo companheirismo de sempre, e ajuda na confecção dos mapas; a Rebeca pelo apoio na tradução de alguns textos; a João, pela enorme paciência e auxílio na elaboração dos perfis dos poços, e a Rodrigo pelas produtivas discussões e ajuda na interpretação sísmica.

Por fim, a Walker por me mostrar a vida de uma perspectiva diferente. Obrigada.

*"Tudo tem o seu tempo determinado, e há
tempo para todo o propósito debaixo do céu."*

Eclesiastes (3:1)

RESUMO

Esta Dissertação de Mestrado compreende a análise estratigráfica da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba e está vinculado ao Projeto de Pesquisa "Geologia e Sistemas Petrolíferos da Bacia Intracratônica do Parnaíba" financiado pela Chevron Brasil e UFRN/PPGG/FUNPEC. A Bacia do Parnaíba é uma sinéclise paleozoica com área de, aproximadamente, 600 mil km² que situa-se no nordeste brasileiro e engloba parte dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia.

A análise estratigráfica efetuada neste estudo foi dividida em duas etapas denominadas análise 1D e análise 2D. Na análise 1D foram utilizados dados de poços, tais como, perfis de raios gama e litológicos, os quais possibilitaram o reconhecimento das unidades genéticas e superfícies cronoestratigráficas da Estratigrafia de Sequências. Por sua vez, a análise 2D baseou-se na interpretação sísmica, a qual, aliada à análise 1D permitiu a demarcação das superfícies estratigráficas e o entendimento do comportamento bidimensional das unidades genéticas identificadas. Nesta etapa também foi confeccionada uma seção estratigráfica com direção aproximada NW-SE que possibilitou um melhor entendimento sobre a história de sedimentação da seção estudada.

Palavras-Chaves: Bacia do Parnaíba; Estratigrafia de Sequências; Sequência Siluriana.

ABSTRACT

This review presents a stratigraphic analysis of the Silurian Sequence of Parnaíba Basin and is related to the “Geology and Petroleum Systems of the Parnaíba Intracratonic Basin” Research Project, funded by Chevron Brasil and UFRN/PPGG/FUNPEC. The Parnaíba Basin is a paleozoic sineclisis which encompasses an area of approximately 600,000 km² and is located in the Northeastern Region of Brazil, distributed throughout the states of Maranhão, Piauí, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia.

The stratigraphic analysis implemented in this study was divided into two stages, referred to 1D and 2D analysis.

In the 1D analysis well log data were used, such as gama ray and lithologic profiles, which provided the recognition of the genetic units and chronostratigraphic surfaces of sequence stratigraphy.

On the other hand, the 2D analysis was based on the seismic interpretation, which along with the 1D analysis allowed the delimitation of the stratigraphic surfaces and the understanding of the bidimensional behavior of the genetic units identified .At this stage, a stratigraphic section with NW-SE direction, approximately, was created as well, providing a better understanding about the sedimentary evolution of the studied section.

Keywords: Parnaíba Basin; Sequence Stratigraphy; Silurian Sequence.

SUMÁRIO

	Pág.
1. Introdução	
1.1 Apresentação e Objetivos	9
1.3 Base de Dados e Métodos Empregados	9
2. Contextualização Geológica	
2.1 Introdução e Localização	13
2.2 Evolução Tectonossedimentar	13
2.3 Arcabouço Estratigráfico	14
2.4 Arcabouço Estrutural e Magmatismo	18
2.5 Sequência Siluriana: Grupo Serra Grande	20
3. Análise Estratigráfica	
3.1 Introdução	22
3.2 Artigo Científico: <i>Análise Estratigráfica da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil</i>	22
3.3 Resultados Complementares	53
4. Conclusões	58
Referências	59

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Mapa Geológico da Bacia do Parnaíba com a localização dos poços e linhas sísmicas utilizados neste estudo (Modificado de CPRM e IBGE).	10
Figura 1.2	Fluxograma apresentando as atividades realizadas durante a confecção deste trabalho.	12
Figura 2.1	Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz <i>et al.</i> 2007).	15
Figura 2.2	Mapa geológico da Bacia do Parnaíba elaborado no âmbito do Projeto BPAR (Chevron/UFRN/FUNPEC).	16
Figura 3.1	Diagrama 1D do poço P3 do intervalo correspondente à Sequência Siluriana.	55
Figura 3.2	Diagrama 1D do poço P4 do intervalo correspondente à Sequência Siluriana.	56
Figura 3.3	Linha Sísmica 3 não interpretada (A) e interpretada (B) apresentando as superfícies cronoestratigráficas identificadas na análise 1D.	57

1. Introdução

1.1 Apresentação e Objetivos

A presente dissertação, intitulada "Análise Estratigráfica da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil", representa parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do grau de Mestre do Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), e está inserida no âmbito do Projeto de Pesquisa "Geologia e Sistemas Petrolíferos da Bacia Intracratônica do Parnaíba, Nordeste do Brasil" (BPAR), financiado pelo convênio entre a Chevron Brasil e o PPGG/FUNPEC/UFRN.

Esta pesquisa visa aplicar os conceitos da estratigrafia de sequências na análise da seção siluriana da Bacia do Parnaíba, utilizando-se para isso, preferencialmente, dados de poços, apoiados por dados sísmicos.

Especificamente, pretende-se reconhecer, por meio dos perfis litológicos e de raios-gama, as fácies sedimentares e seus sistemas deposicionais associados, assim como descritos na literatura. Posteriormente, visa-se definir os ciclos e os padrões de ciclicidade, para com isso, delimitar tratos de sistemas e melhor caracterizar a evolução da Supersequência Siluriana.

Uma vez definidas, em escala 1D, as superfícies cronoestratigráficas e as unidades genéticas, objetiva-se caracterizar, por meio de seções estratigráficas e sísmicas o comportamento destas unidades genéticas ao longo da área estudada.

Além disso, este trabalho visa também indicar momentos da história evolutiva da sequência estudada propícios à formação de rochas com potencial para geração e acumulação de hidrocarbonetos.

1.2 Base de Dados e Métodos Empregados

Para atender aos objetivos propostos acima, a base de dados disponível para este estudo conta com informações de cinco poços de sondagem denominados P1, P2, P3, P4 e P5 (Figura 1.1), representadas por seus arquivos gerais e pastas, os quais fornecem dados de litologia e perfis geofísicos, além de três linhas sísmicas que atravessam os poços selecionados, aqui referidas por L1, L2 e L3. Agrega-se a isso, um acervo

bibliográfico sobre a geologia da Bacia do Parnaíba, particularmente da Seção Siluriana e dos métodos empregados.

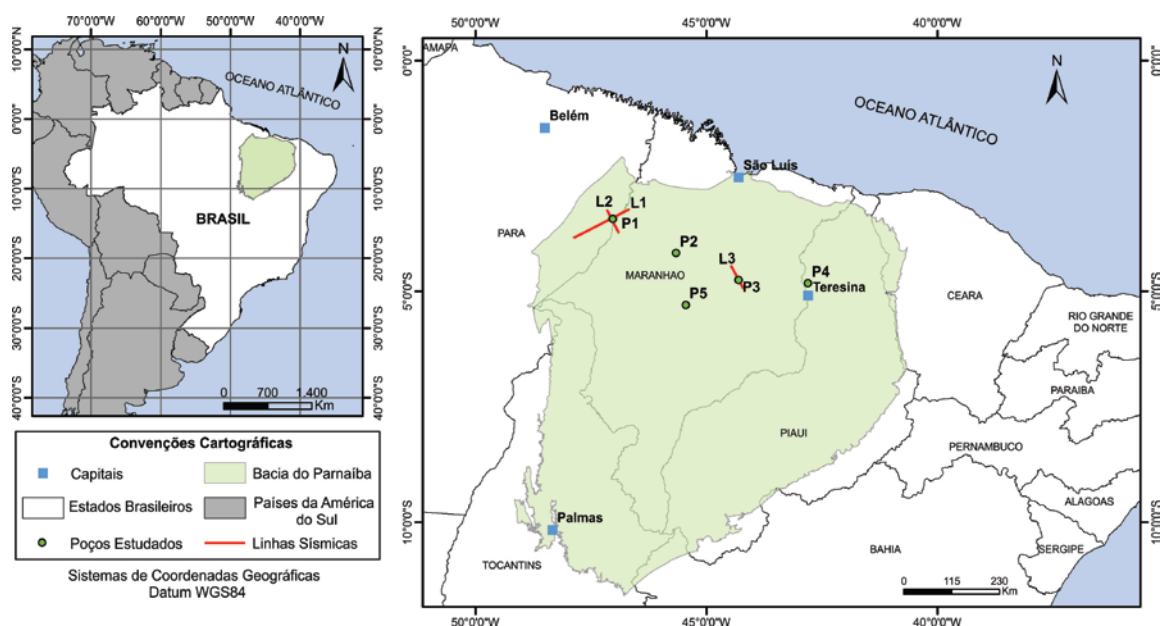


Figura 1.1: Mapa Geográfico da Bacia do Parnaíba com a localização dos poços e linhas sísmicas utilizados neste estudo (Modificado de CPRM e IBGE).

O desenvolvimento desta pesquisa obedeceu as etapas apresentadas na figura 1.2 e teve início com um levantamento dos principais trabalhos realizados na Bacia do Parnaíba, visando aprofundar os conhecimentos acerca da área de estudo e das ferramentas de trabalho, e com a organização da base de dados de poços e sísmicos.

Posteriormente, deu-se início a análise estratigráfica da Seção Siluriana. Essa análise envolveu duas etapas, denominadas de análise 1D, onde foram analisados os poços detalhadamente, seguida da etapa 2D, onde foi confeccionada uma seção estratigráfica de direção NW-SE e analisadas as três linhas sísmicas previamente selecionadas.

Na análise 1D foram identificadas, para cada poço estudado, as litofácies, com base nos perfis litológicos e de raios gama; reconhecidos os sistemas deposicionais; delimitados os ciclos e definidos os padrões de ciclicidade; e identificadas as superfícies chaves e as unidades genéticas da estratigrafia de sequências. Nesta etapa, também foram confeccionados histogramas de frequência apresentando a porcentagem relativa das litofácies

descritas nos poços estudados. Esses histogramas possibilitaram a elaboração, de maneira hipotética, da curva de variação do nível de base.

Na análise 2D elaborou-se uma seção estratigráfica NW-SE e foram interpretadas as seções sísmicas, por meio de amarrações sísmica-poço, visando rastrear e mapear as superfícies e unidades estratigráficas.

Em seguida, os resultados obtidos a partir dessas análises foram integrados e interpretados, permitindo, com isso, a confecção modelos estratigráficos evolutivos para a Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, os quais possibilitam um melhor entendimento da mesma.

Por fim, foram elaborados esta Dissertação de Mestrado e um artigo científico, que consta no capítulo 3 da mesma, ambos apresentam os resultados finais desta pesquisa.

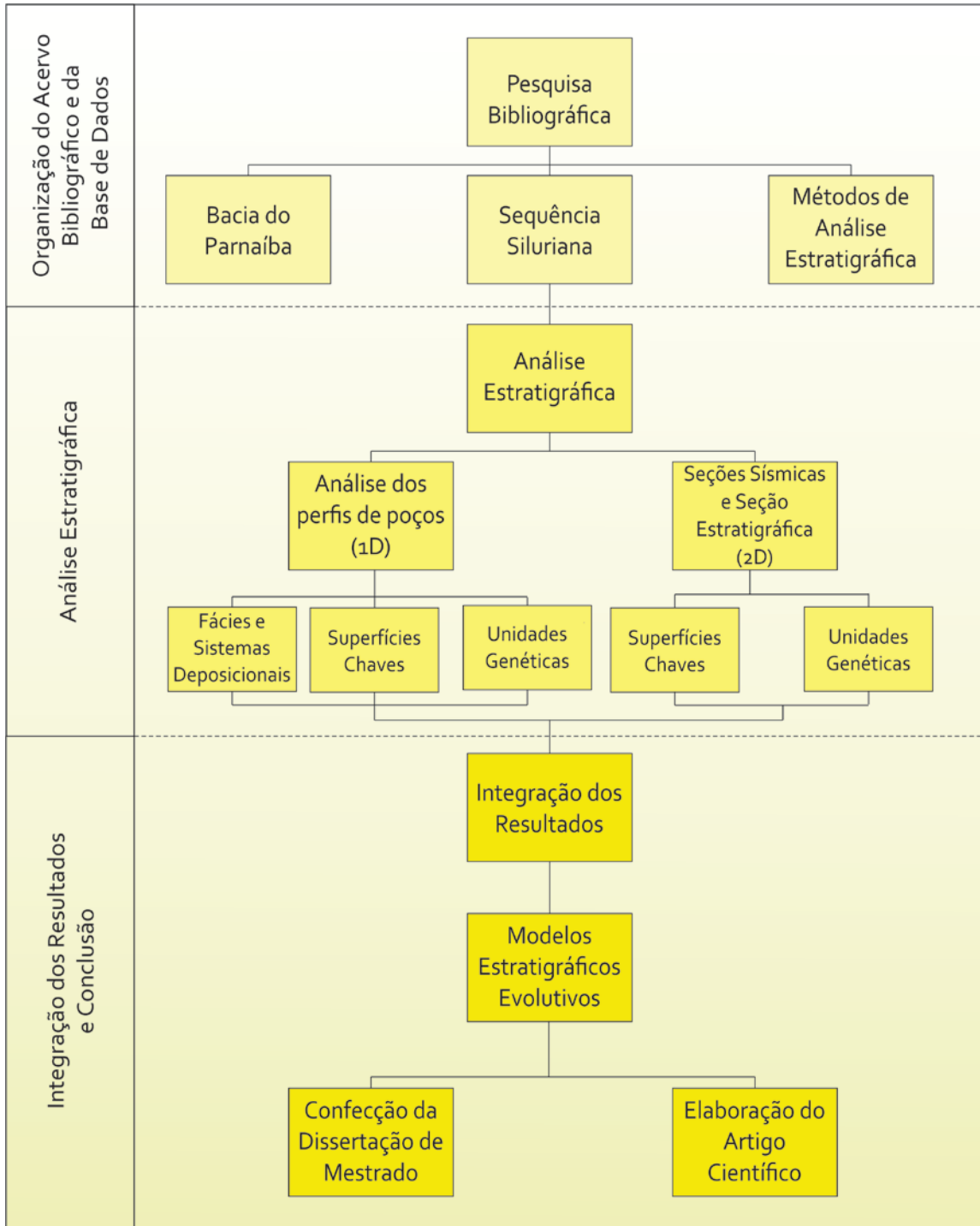


Figura 1.2: Fluxograma apresentando as atividades realizadas durante a confecção deste trabalho.

2. Bacia do Parnaíba

2.1 Introdução e Localização

Este item apresenta o resultado do levantamento bibliográfico acerca dos principais aspectos geológicos da Bacia do Parnaíba, tais como, sua evolução, estratigrafia, arcabouço estrutural e magmatismo, com ênfase para a sequência foco deste trabalho (Sequência Siluriana).

A Bacia do Parnaíba abrange uma área de aproximadamente 600 mil km² da porção noroeste do Nordeste do Brasil. Compreende uma área sedimentar que engloba os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia (Figura 1.1). Trata-se de uma sinéclise paleozoica com geometria elíptica e eixo maior com direção NE-SW. Limita-se a noroeste com a Bacia de Marajó e Médio Amazonas mediante o Arco de Tocantins; a norte com bacias de São Luiz e Barreirinhas das quais está separada pelo Arco Ferrer-Urbano Santos; a oeste pela faixa Paraguai-Araguaia, e a sul e sudeste pela bacia Sanfranciscana por meio do Lineamento senador Pompeu (Góes 1995).

Essa bacia está inserida na plataforma Sul-americana, assentada sobre um embasamento cristalino, composto principalmente por rochas metamórficas oriundas de processos tectonomagmáticos (Góes & Feijó 1994), que se estabilizou com o fim do Ciclo Brasileiro. A Bacia do Parnaíba é constituída por rochas sedimentares depositadas do Siluriano ao Cretáceo, e rochas intrusivas e extrusivas ligadas a eventos magmáticos de idades juro-triássica a eocretácia (Góes & Feijó 1994)

2.2 Evolução Tectonossedimentar

A evolução tectonossedimentar da bacia do Parnaíba é atribuída a pulsos magmáticos ocorridos durante o final do Ciclo Brasileiro, os quais propiciaram a formação de grábens ou riftes com eixos de direção N-NE (Góes *et al.* 1990). Em resposta a esse estímulo termomecânico estabeleceu-se, na região, uma grande depressão de idade ordoviciana, onde depositaram-se os sedimentos fluviais a marinhos rasos, hoje pertencentes ao Grupo Serra Grande (Fms. Ipu, Tianguá e Jaicós). O final dessa deposição é marcado por

uma discordância de caráter regional associada à Orogenia Caledoniana (Góes *et al.* 1990).

A continuação dos processos termiais aliado aos flexurais, resultou em um aumento na área de sedimentação. Esse crescimento é testemunhado pela presença das rochas sedimentares do Grupo Canindé. O encerramento desse ciclo de sedimentação é marcado por uma discordância regional relacionada à Orogenia Eoherciniana (Góes *et al.* 1990).

No Neocarbonífero, a sedimentação foi retomada com a deposição das rochas que compõem o Grupo Balsas. Nesta fase houve uma progressiva desertificação e o deslocamento dos depocentros para a porção central da bacia (Góes *et al.* 1990).

No Juro-Triássico, durante a fragmentação inicial de Gondwana, desenvolveu-se na bacia um significativo processo magmático, que foi, posteriormente seguido pela deposição da Formação Pastos Bons (Vaz *et al.* 2007). O ciclo sedimentar encerra-se no Cretáceo, e assinala duas fases distintas: a primeira relacionada ao magmatismo eocretáceo, associado com a abertura do Atlântico Sul; e a segunda diz respeito à deposição lacustre a continental das formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru (Góes *et al.* 1990).

2.3 Arcabouço Estratigráfico

Os registros sedimentares que ocorrem na Bacia do Parnaíba foram agrupados, segundo Vaz *et al.* (2007), em cinco supersequências, todas delimitadas por discordâncias (Figura 2.1), a saber, sequências Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé), Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica (Formação Pastos Bons) e Cretácea (Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecurú). A Figura 2.2 apresenta o mapa geológico da Bacia do Parnaíba e as áreas de exposição dessas sequências deposicionais.

A Supersequência Siluriana, foco deste estudo, representa um ciclo Transgressivo-Regressivo completo e é constituída pelas rochas do Grupo Serra Grande, o qual é composto pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. A Formação Ipu é composta por arenitos com seixos e conglomerados com

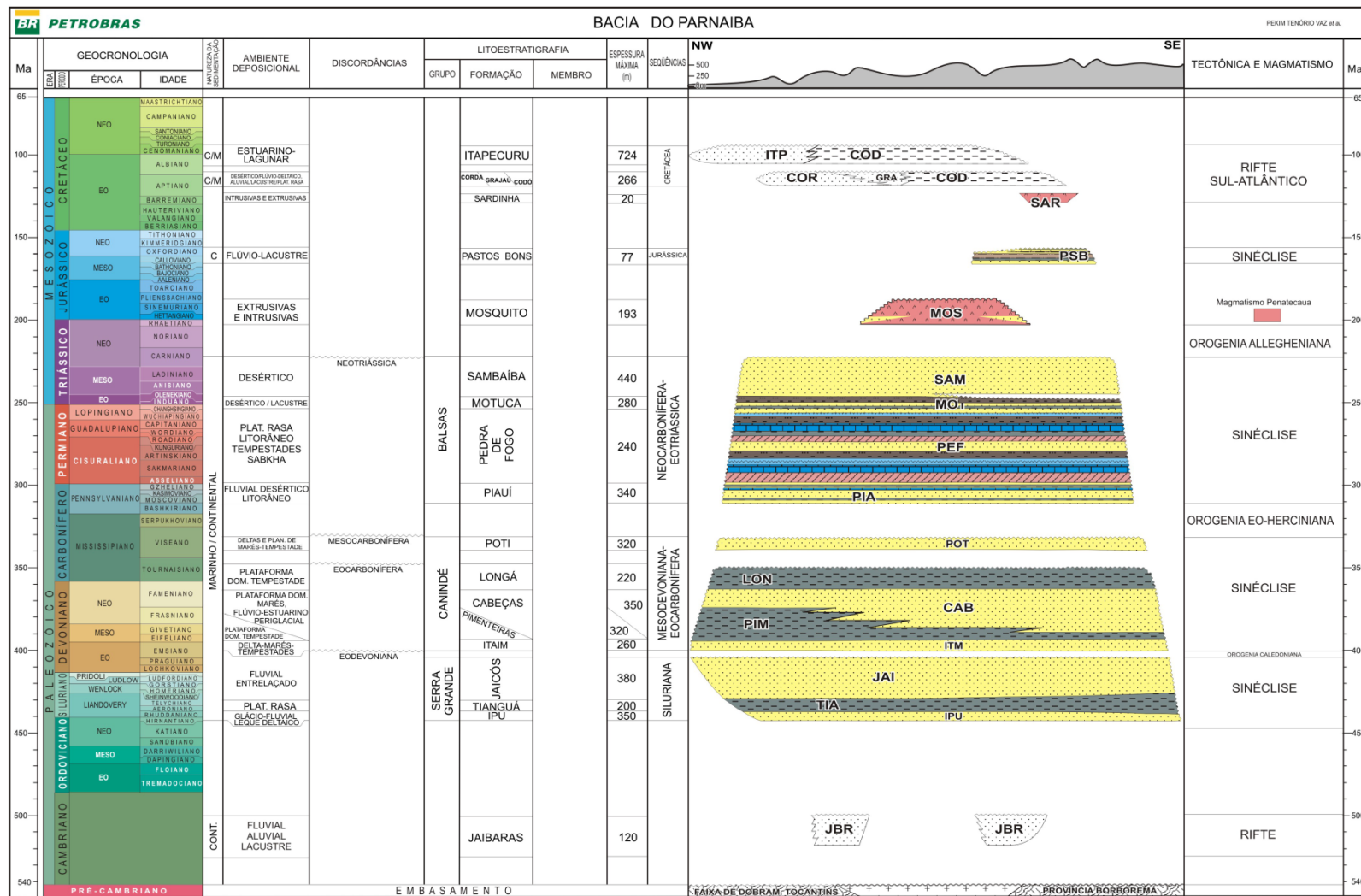


Figura 2.1: Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz et al. 2007).

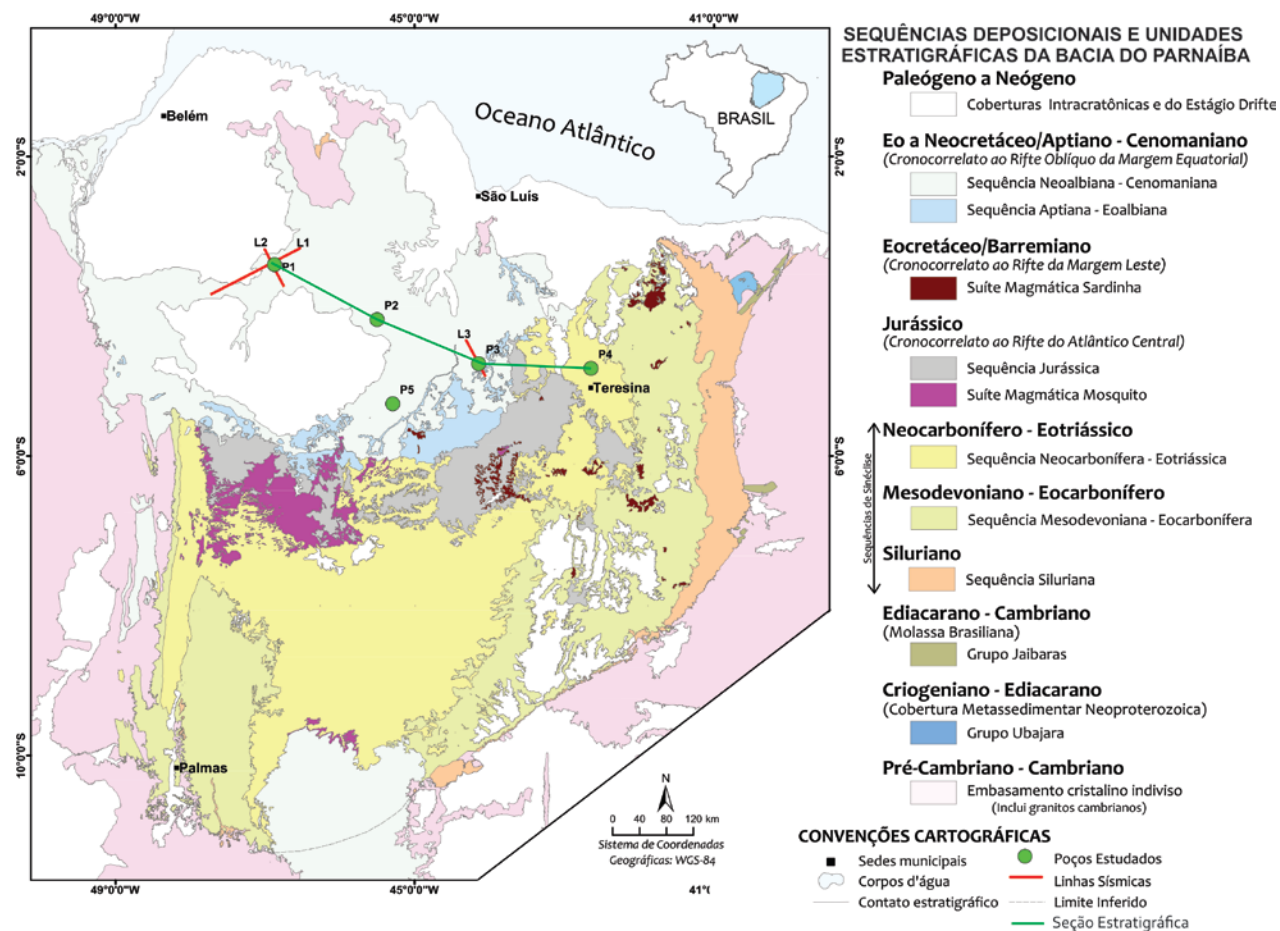


Figura 2.2: Mapa geológico da Bacia do Parnaíba elaborado no âmbito do Projeto BPAR (Chevron/UFRN/FUNPEC) a partir de modificações nas cartas ao milionésimo da CPRM. Neste mapa observa-se a área aflorante do Grupo Serra Grande, restrita ao leste e sudeste da bacia, assim como a localização dos poços e linhas sísmicas estudados e da seção estratigráfica confeccionada.

matriz argilosa depositados numa grande variedade de ambientes, de glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicas (Caputo 1984). A Formação Tianguá apresenta folhelhos cinza-escuros bioturbados depositados em ambiente de plataforma rasa. Por fim, a Formação Jaicós congrega arenitos grossos, mal selecionados, com pelitos subordinados, depositados em sistema fluvial entrelaçado (Góes & Feijó 1994).

A Supersequência Mesodevoniana-Eocarbonífera é composta pelas rochas do Grupo Canindé (formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti). A Formação Itaim designa arenitos finos a médios depositados em sistemas deltaicos e plataformais. Por sua vez, a Formação Pimenteiras compõe-se de folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, ricos em matéria orgânica, cuja deposição se deu em um sistema de plataforma rasa dominada por tempestades (Vaz *et al.* 2007). Na Formação Cabeças predominam os arenitos brancos e cinzas; diamictitos ocorrem eventualmente. Tilitos, pavimentos e seixos estriados denotam um ambiente glacial ou periglacial (Caputo 1984). A Formação Longá consiste de folhelhos escuros de sistema plataformal dominado por tempestade (Góes & Feijó 1994), já a Formação Poti, unidade mais jovem desta sequência, é composta por arenitos brancos, com lâminas de silitos, associados a deltas e a planícies de maré.

A terceira supersequência corresponde ao intervalo Neocarbonífero-Eotriássico, o qual compreende o Grupo Balsas, que engloba as formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. Na Formação Piauí, predominam arenitos intercalados com folhelhos, entretanto, ainda não há um consenso em relação ao ambiente de deposição dessas rochas. Alguns autores sugerem um ambiente continental e litorâneo, sob um clima extremamente árido (Goés & Feijó 1994), ao passo que outros associam tais depósitos a um sistema fluvial, com contribuição eólica e breves incursões marinhas (Lima & Leite 1978). A Formação Pedra do Fogo é caracterizada por uma grande variedade de rochas, com presença de silexitos, calcários oolíticos e pisolíticos, associadas a um ambiente marinho raso a litorâneo, com planícies de *sabkha* (Goés & Feijó 1994). A Formação Motuca é caracterizada por silitos, arenitos e, subordinadamente, folhelhos, evaporitos (compostos por anidrita) e raros

calcários. Essas rochas foram depositadas, de acordo com Góes & Feijó (1994), no contexto de um ambiente desértico, com lagos associados. Finalmente, a Formação Sambaíba é constituída por arenitos com estratificações cruzadas acanaladas de grande porte, caracterizando dunas eólicas (Vaz *et al.* 2007). Esta unidade corresponde ao final da desertificação da bacia, ocorrida no Eotriássico.

A Supersequência Jurássica é composta pela Formação Pastos Bons, a qual é constituída por arenitos, folhelhos e siltitos, cuja deposição estaria relacionada à subsidência causada pela soma dos pesos da carga de derrames basálticos, relacionados ao Vulcanismo Mosquito, ocorrido no Eojurássico, além da carga sedimentar existente (Góes *et al.* 1990).

Por fim, a Supersequência Cretácea abrange as formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru. A Formação Codó é constituída por folhelhos, calcários, siltitos, evaporitos (formados por gipsita e anidrita) e arenitos associados a deposição em ambiente marinho raso, assim como em sistemas lacustre e fluvio-deltaico. A Formação Corda é composta essencialmente por arenitos com estratificações cruzadas de grande porte que sugerem a deposição em ambiente desértico (Vaz *et al.* 2007). A Formação Grajaú, por sua vez, agrega arenitos brancos, finos a conglomeráticos. Por último, a Formação Itapecuru é composta por arenitos, com ocorrência subordinada de pelitos e arenitos conglomeráticos. As formações Grajaú e Itapecuru foram depositadas no mesmo contexto ambiental da Formação Codó.

2.4 Arcabouço Estrutural e Magmatismo

O Lineamento Transbrasiliano é, sem dúvida, a feição morfo-estrutural mais importante da Bacia do Parnaíba, onde é evidenciado por falhas de *trend* NE-SW, as quais cortam rochas paleozoicas e mesozoicas (Santos *et al.* 2013). Esta estrutura estende-se por, aproximadamente, 2700Km, desde o Estado do Ceará ao Mato Grosso, no território brasileiro, alcançando ainda o Paraguai e a Argentina. No território africano é conhecido Zona de Cisalhamento de Hoggar-Kandi e se estende desde a costa do Togo até a região central da Argélia.

O Lineamento Transbrasiliano é considerado uma das principais suturas relacionadas à gênese do Gondwana, unindo dois amplos domínios geotectônicos: o Domínio Pré-Brasiliano e o Domínio Brasileiro, sendo o primeiro não afetado pelos eventos do Ciclo Brasileiro (Brito Neves & Cordani 1991).

A principal fase de deformação ao longo das falhas que compõem o Lineamento Transbrasiliano possui cinemática transcorrente dextral (Delgado *et al.* 2003), igualmente ao que foi observado na Zona de Cisalhamento de Hoggar-Kandi, na África. Entretanto, outros autores sugerem que como trata-se de lineamentos da Província Borborema, essas estruturas possuem histórias complexas e evolução policíclicas dessa forma, devem ser abordadas de maneira mais complexa.

No Jurássico e Cretáceo, o evento de abertura do Oceano Atlântico foi caracterizado por diversos episódios magmáticos. Neste período instalaram-se, na Bacia do Parnaíba, rochas ígneas intrusivas e extrusivas de composição alcalina e básica. Estas rochas foram associadas a duas unidades litoestratigráficas, de acordo com suas idades obtidas pelos métodos K-Ar e Ar-Ar, denominadas Formação Mosquito e Formação Sardinha.

A Formação Mosquito agrega corpos de basalto, pretos a roxos, situados entre as cidades de Fortaleza dos Nogueiras e Barra do Corda, na porção central do estado do Maranhão (Aguiar 1971). Possui idade de aproximadamente 178 M.a. (Eojurássico), e pode ser correlacionada ao Magmatismo Penatecaua das bacias do Solimões e Amazonas (Mizusaki & Thomas Filho 2004). A ocorrência dessa formação concentra-se na porção oeste da Bacia do Parnaíba.

Por sua vez, a Formação Sardinha (Aguiar 1969), de idade eocretácea (124 M.a.), é caracterizada por basaltos pretos e amigdaloidais, e é correlacionada ao magmatismo Serra Geral, da Bacia do Paraná (Mizusaki & Thomas Filho 2004), ocorrendo de forma mais efetiva na parte leste da Bacia do Parnaíba.

2.5 Sequência Siluriana: Grupo Serra Grande

A Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba é representada litoestratigraficamente pelo Grupo Serra Grande. A designação Serra Grande foi inicialmente proposta por Small (1914) para descrever uma seção composta por arenitos, conglomerados e calcários da Bacia do Parnaíba e calcários da Bacia de Ubajara. Por sua vez, Kegel (1953) excluiu as rochas carbonáticas e referiu-se a sequência sedimentar inferior da bacia como formação, de acordo com a presença de uma discordância angular que separa as rochas destas duas bacias. Posteriormente, Carozzi *et al.* (1975) elevaram esta formação à categoria de grupo, e Caputo (1984) e Caputo & Lima (1984) sugeriram a subdivisão do Grupo Serra Grande em três formações (Ipú, Tianguá e Jaicós), como é consensualmente aceito até os dias atuais.

O Grupo Serra Grande, em subsuperfície, ocorre praticamente em toda a extensão da bacia. Contudo, sua área aflorante é restrita a uma estreita faixa a leste da bacia, bordejada por rochas do embasamento (Figura 2.2). Esse grupo é formado por sucessões sedimentares diferenciadas, iniciando com uma sucessão continental fluvial, sobreposta por uma sucessão marinha e, em seguida, retornando a uma sucessão continental fluvial, constituindo, dessa forma, um amplo ciclo transgressivo-regressivo completo (Caputo & Lima 1984).

A primeira sucessão continental fluvial é tipificada pelos litótipos da Formação Ipu, terminologia inicialmente proposta por Campbell (1949). Devido a ausência de fósseis diagnósticos, a idade de deposição dos litótipos desta unidade foi atribuída com base em correlações com unidades cronoequivalentes de outras bacias, ou ainda de acordo com idades de formações fossilíferas sobrejacentes (Santos, 2005). Desta forma, Aguiar (1971) conferiu a esta unidade idade siluro-devoniana, ao passo que Moore (1963) atribuiu a ela idade ordoviciana ou eo-siluriana.

A Formação Ipu apresenta espessura máxima de 350 metros e é caracterizada por arenitos, arenitos conglomeráticos, conglomerados e diamictitos. As estruturas sedimentares mais abundantes são as estratificações

cruzadas acanaladas e tabulares. Parte das rochas desta formação consistem em depósitos glaciogênicos retrabalhados por depósitos flúvio-glaciais, e parte estão relacionadas a depósitos de leques aluviais (Caputo, 1984).

Sobreposta concordantemente aos litótipos da Formação Ipu depositaram-se as rochas da Formação Tianguá, as quais apresentam espessura máxima de 200 metros. Nesta unidade foram encontrados microfósseis do gênero *Manograptus*, os quais atribuem idade siluriana para este intervalo (Caputo & Lima, 1984). A Formação Tianguá registra a primeira ingressão marinha da Bacia do Parnaíba, sendo representada por folhelhos cinza-escuros, bioturbados, arenitos cinza-claros, finos a médios, feldspáticos e intercalações de siltitos e folhelhos cinza-escuros, bioturbados e micáceos (Vaz *et al.* 2007). Esses litótipos são interpretados como depositados em ambiente marinho raso, sob ação de ondas (Góes & Feijó 1994).

Por fim, a Formação Jaicós, que apresenta cerca de 380m de espessura máxima, é representada por conglomerados com alta maturidade textural e mineralógica, intercalados com arenitos grossos de cor cinza esbranquiçada, exibindo, em geral, estratificações cruzadas acanaladas. Estes litótipos foram interpretados como depositados em um contexto fluvial. Nesta unidade também não foram encontrados microfósseis, e por isso, sua idade é controversa. Todavia, Grahn (1992 *apud* Santos & Carvalho 2009) identificou microfósseis na Formação Jaicós que indicam uma sedimentação do Siluriano e Devoniano.

O limite superior desta formação é pouco evidenciado devido a semelhança entre os litótipos da Formação Jaicós e da sobreposta Formação Itaim, dificultando a identificação de uma provável discordância (Caputo & Lima, 1984). Os litótipos dessa formação exibem ainda indicadores de migração de barras cascalhosas de um sistema fluvial entrelaçado, além de marcas onduladas de cristas sinuosas (3D). Esta unidade encerra o ciclo transgressivo-regressivo do Grupo Serra Grande.

3. Análise Estratigráfica

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta o artigo científico elaborado com base na análise estratigráfica da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, objeto principal desta Dissertação de Mestrado.

O artigo científico apresenta, inicialmente, a base de dados e os métodos utilizados neste estudo, seguidos de uma síntese da geologia da Bacia do Parnaíba. Posteriormente, foram discutidos os resultados da análise estratigráfica com base na interpretação dos perfis de raios gama dos poços, seções sísmicas e seção estratigráfica. Por fim, foram apresentadas as conclusões e considerações finais desta pesquisa.

Produtos adicionais das análises 1D e 2D que não puderam ser incorporados no artigo científico, em virtude das limitações de espaço que constam nas normas do periódico, serão apresentados no final deste capítulo.

3.2 Artigo Científico: Análise Estratigráfica da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil

Este item contém a versão submetida do artigo científico à Revista Geociências da UNESP (eISSN: 1980-900x) constituindo requisito obrigatório para a conclusão do Curso de Mestrado do PPGG/UFRN. Esta versão apresenta formatação e numeração equivalentes ao que foi encaminhado à revista.

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA SEQUÊNCIA SILURIANA DA BACIA DO PARNAÍBA, NORDESTE DO BRASIL

Erlanny Maria Alves CRUZ^{1,2}, Valéria Centurion CÓRDOBA^{1,2,3}, Débora do Carmo SOUSA^{2,3}

(1) Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, PPGG-UFRN; Avenida Senador Salgado Filho, 3000 - Campus Universitário - Caixa Postal 1639 - CEP 59078-970 - Natal - RN -
erlanny.m.alves@gmail.com.

(2) Laboratório de Geologia e Geofísica do Petróleo Universidade Federal do Rio Grande do Norte - LGGP - UFRN; Avenida Senador Salgado Filho, 3000 - Campus Universitário - Caixa Postal 1639 - CEP 59078-970 - Natal - RN

(3) Departamento de Geologia - Centro de Ciências Exatas e da Terra - DG - CCET - UFRN; Avenida Senador Salgado Filho, 3000 - Campus Universitário - Caixa Postal 1639 - CEP 59078-970 - Natal - RN

Introdução

Base de Dados e Métodos

Contextualização Geológica

Análise Estratigráfica

Síntese Estratigráfica

Considerações Finais

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

RESUMO

O presente trabalho compreende uma análise estratigráfica, à luz da Estratigrafia de Sequências, da seção siluriana da Bacia do Parnaíba a partir da interpretação de perfis de poços e dados sísmicos. Esta análise permitiu reconhecer as fácies sedimentares, interpretar os sistemas deposicionais e definir os ciclos e conjuntos de ciclos, os quais possibilitaram identificar os tratos de sistemas que compõem a Sequência Siluriana. Seguindo esta concepção, essa sequência, que corresponde litoestratigraficamente às formações Ipu, Tianguá e Jaicós, pôde ser compartimentada em cinco intervalos de acordo com as tendências de aumento ou diminuição no espaço de acomodação, sendo estes: Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo precoce (baixo espaço de acomodação), de Nível de Base Baixo tardio (moderado espaço de acomodação), Transgressivo (alto espaço de acomodação), de Nível de Base Alto precoce (moderado espaço de acomodação) e, por fim, de Nível de Base Alto tardio (baixo espaço de acomodação). Este arranjo estratigráfico atesta que a evolução desta sequência é pontuada por um ciclo completo transgressivo-regressivo.

Palavras-Chaves: Bacia do Parnaíba; Estratigrafia de Sequências; Sequência Siluriana.

ABSTRACT

This review presents a stratigraphy analysis, based on the concepts of Sequence Stratigraphy, of the Silurian Section of Parnaíba Basin according to well logs and seismic data interpretation. According to this model, it was possible to define the sedimentary facies, the depositional systems, as well as the cycles and the cycle sets, allowing the identification of the systems tracts that make part of the Silurian Sequence. Following this assumption, the Silurian Section, which is related to Ipu, Tianguá and Jaicós formations, can be divided into five intervals, according to the increase and decrease trends in the accommodation: Early Lowstand Systems Tract (low accommodation), Late Lowstand (moderate accommodation), Transgressive (high accommodation), Early Highstand (moderate accommodation) and finally, Late Highstand (low accommodation). This stratigraphic arrangement proves that the evolution of the Silurian Section is characterized by a complete transgressive-regressive cycle.

Keywords: Parnaíba Basin; Sequence Stratigraphy; Silurian Sequence.

INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo primordial aplicar os conceitos da estratigrafia de seqüências na análise da seção siluriana da Bacia do Parnaíba, utilizando-se para isso dados de poços e dados sísmicos.

A Bacia do Parnaíba abrange uma área de aproximadamente 600 mil km² da porção noroeste do Nordeste do Brasil. Compreende uma área sedimentar que engloba os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia (Figura 1). Trata-se de uma sinéclise paleozoica com geometria elíptica e eixo maior com direção NE-SW.

A Sequência Siluriana, foco deste estudo, compreende a seção mais basal da Bacia do Parnaíba e é constituída litoestratigraficamente pelo Grupo Serra Grande. Esse grupo é formado por sucessões sedimentares diferenciadas, que se iniciam com depósitos fluviais (Formação Ipu), sobrepostos por depósitos marinhos (Formação Tianguá) e estes, sobrepostos novamente por depósitos fluviais (Formação Jaicós).

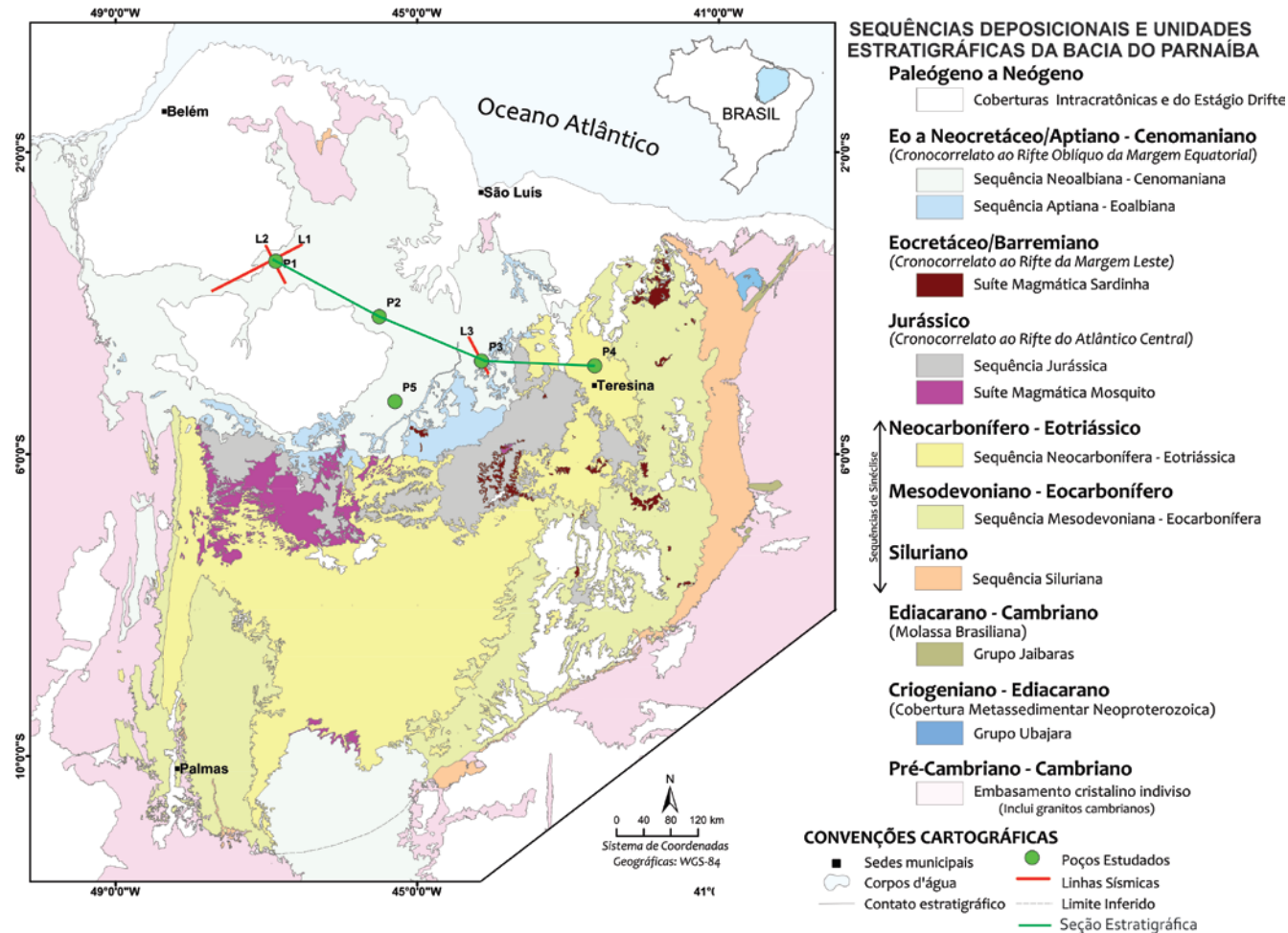


Figura 1: Mapa geológico da Bacia do Parnaíba elaborado no âmbito do Projeto BPAR (Chevron/UFRN/FUNPEC) a partir de modificações nas cartas ao milionésimo da CPRM. Este mapa apresenta a localização dos poços e das linhas sísmicas analisados e da seção estratigráfica elaborada.

BASE DE DADOS E MÉTODOS

A base de dados utilizada neste trabalhos foi constituída por cinco perfis de poços de sondagem, denominados P1, P2, P3, P4 e P5, que apresentam dados de litologia e perfis geofísicos, além de três linhas sísmicas que atravessam os poços selecionados, aqui referidas por L1, L2 e L3.

Essa base de dados foi fornecida pelo Projeto de Pesquisa "Geologia e Sistemas Petrolíferos da Bacia Intracratônica do Parnaíba" financiado por um convênio entre a Chevron Brasil e o Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG - UFRN). Além disso, a base de dados contou ainda com um acervo bibliográfico sobre a geologia da Bacia do Parnaíba, especialmente da Seção Siluriana e também dos métodos empregados neste estudo.

Na análise 1D foram reconhecidas as litofácies, com base nos perfis litológicos e de raios gama; identificados os sistemas deposicionais; delimitados os ciclos e definidos os padrões de ciclicidade; e caracterizadas as superfícies chaves e as unidades genéticas da estratigrafia de sequências. Nesta etapa, também foram confeccionados histogramas de frequência, apresentando a porcentagem relativa das litofácies descritas nos poços estudados, que possibilitaram a confecção de uma curva aproximada de variação do nível de base.

Na análise 2D foi elaborada uma seção estratigráfica NW-SE a qual englobou quatro dos poços estudados, assim como foram interpretadas as três seções sísmicas onde, em todas elas, foram posicionadas as superfícies cronoestratigráficas e delimitadas as unidades genéticas.

Na última etapa de trabalho, os resultados da análise estratigráfica foram integrados e interpretados, possibilitando a confecção modelos estratigráficos evolutivos para a Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, os quais permitiram um melhor entendimento da mesma.

CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

EVOLUÇÃO TECTONOSSEDIMENTAR

A evolução tectonossedimentar da Bacia do Parnaíba é atribuída a pulsos magmáticos ocorridos durante o final do ciclo Brasileiro, os quais propiciaram a

formação de grábens ou riftes com eixos de direção N-NE (Góes *et al.* 1990). Em resposta a esse desenvolvimento termomecânico estabeleceu-se, na região, uma grande depressão ordoviciana, onde depositaram-se os sedimentos fluviais a marinhos rasos hoje pertencentes ao Grupo Serra Grande (Formações Ipu, Tianguá e Jaicós). O final dessa deposição é marcado pela Orogenia Caledoniana, a qual resultou em uma discordância de caráter regional (Góes *et al.* 1990).

A continuação dos processos termiais aliados aos flexurais, resultou em um aumento na área de sedimentação (Góes *et al.* 1990). Esse crescimento é testemunhado pela presença das rochas sedimentares do Grupo Canindé. O encerramento desse ciclo de sedimentação é marcado por uma discordância regional relacionada à Orogenia EoHerciniana (Góes *et al.* 1990).

No Neocarbonífero, a sedimentação foi retomada com a deposição das rochas que compõem o Grupo Balsas. Nesta fase houve uma progressiva desertificação e o deslocamento dos depocentros para a porção central da bacia (Góes *et al.* 1990).

No Juro-Triássico, durante a fragmentação inicial de Gondwana, desenvolveu-se na bacia um significativo processo magmático, que foi, posteriormente seguido pela deposição da Formação Pastos Bons (Vaz *et al.* 2007). O ciclo sedimentar encerra-se no Cretáceo, e assinala duas fases distintas: a primeira relacionada ao magmatismo eocretáceo, associado com a abertura do Atlântico Sul; e a segunda diz respeito à deposição lacustre a continental das formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru (Góes *et al.* 1990).

ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO

Os registros sedimentares que ocorrem na Bacia do Parnaíba foram agrupados, segundo Vaz *et al.* (2007), em cinco grandes sequências, todas delimitadas por discordâncias (Figura 2), a saber: sequências Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé), Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica (Formação Pastos Bons) e Cretácea (Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecurú). A Figura 1 apresenta o mapa geológico da Bacia do Parnaíba e as áreas de exposição dessas sequências deposicionais.

A Sequência Siluriana é constituída pelas rochas do Grupo Serra Grande, o qual é composto pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. A Formação Ipu agrega arenitos com

seixos e conglomerados com matriz argilosa depositados numa grande variedade de ambientes, desde glacial proximal e glacio-fluvial, até leques ou frentes deltaicas (Caputo 1984). A Formação Tianguá apresenta folhelhos cinza-escuros bioturbados depositados em ambiente de plataforma rasa. Por fim, a Formação Jaicós congrega arenitos grossos, mal selecionados, com pelitos subordinados, depositados em sistema fluvial entrelaçado (Góes & Feijó 1994).

A Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera é composta pelas rochas do Grupo Canindé (formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti). A Formação Itaim designa arenitos finos a médios depositados em sistemas deltaicos e plataformais. Por sua vez, a Formação Pimenteiras compõe-se de folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, ricos em matéria orgânica, cuja deposição se deu em um sistema de plataforma rasa dominada por tempestades (Vaz *et al.* 2007). Na Formação Cabeças predominam arenitos brancos e cinzas; diamictitos ocorrem eventualmente. Tilitos, pavimentos e seixos estriados denotam um ambiente glacial ou periglacial (Caputo 1984). A Formação Longá consiste de folhelhos escuros de sistema plataformais dominado por tempestade (Góes & Feijó 1994), já a Formação Poti, unidade mais jovem desta sequência, é composta por arenitos brancos, com lâminas de siltitos, associados a deltas e a planícies de maré.

A terceira sequência corresponde ao intervalo Neocarbonífero-Eotriássico, o qual compreende o Grupo Balsas, que engloba as formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. Na Formação Piauí, predominam arenitos intercalados com folhelhos, depositados em ambiente continental e litorâneo, sob um clima extremamente árido (Goés & Feijó 1994). A Formação Pedra do Fogo é caracterizada por uma grande variedade de rochas, com presença de silexitos, calcários oolíticos e pisolíticos, associadas a um ambiente marinho raso a litorâneo, com planícies de *sabkha* (Goés & Feijó 1994). A Formação Motuca é caracterizada por siltitos, arenitos e, subordinadamente, folhelhos, evaporitos (compostos por anidrita) e raros calcários. Esses depósitos foram associados, por Góes & Feijó (1994), à deposição em ambiente desértico, com lagos associados. Finalmente, a Formação Sambaíba é constituída por arenitos com estratificações cruzadas acanaladas de grande porte, caracterizando dunas eólicas. Esta unidade corresponde ao final da desertificação da bacia, ocorrida no Eotriássico.

A Sequência Jurássica é composta pela Formação Pastos Bons, a qual é constituída por arenitos, folhelhos e siltitos de origem fluvio-lacustre, cuja deposição estaria associada à subsidência causada pela soma dos pesos da carga de derrames basálticos, relacionados ao Vulcanismo Mosquito, ocorrido no Eojurássico, além da carga sedimentar existente (Góes *et al.* 1990).

Por fim, a Sequência Cretácea abrange as formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru. A Formação Codó é constituída por folhelhos, calcários, siltitos, evaporitos (formados por gipsita e anidrita) e arenitos associados a deposição em ambiente marinho raso, assim como em sistemas lacustre e fluvio-deltaico. A Formação Corda é composta essencialmente por arenitos com estratificações cruzadas de grande que sugerem a deposição em ambiente desértico (Vaz *et al.* 2007). A Formação Grajaú, por sua vez, agrega arenitos brancos, finos a conglomeráticos. Por último, a Formação Itapecuru é composta por arenitos, com ocorrência subordinada de pelitos e arenitos conglomeráticos. As formações Grajaú e Itapecuru foram depositadas no mesmo contexto ambiental da Formação Codó (Vaz *et al.* 2007).

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA

ESTRATIGRAFIA DE SUCESSÕES FLUVIAIS

A Estratigrafia de Sequências é o ramo da geologia que se preocupa com o estudo de estratos geneticamente relacionados, associados a um arcabouço de superfícies cronoestratigráficas significativas (Della Fávera, 2001). Essa ciência derivou-se da sismoestratigrafia, que surgiu na década de 1960 e possibilitou a correlação de seções sísmicas gerando imagens tridimensionais, bem com a integração com dados de poços que permitiram a identificação da geometria dos estratos e descontinuidades físicas no registro sedimentar (Severiano Ribeiro, 2001).

Os primeiros estudos acerca dessa nova ferramenta foram realizados pelos pesquisadores da Exxon Research Company, liderados por Peter Vail, o qual utilizou a associação de seções sísmicas para a detecção de relações estratigráficas. Essa pesquisa resultou, em 1977, em uma publicação no *best seller* da AAPG *Memoir 26*, e lançou os fundamentos clássicos da Estratigrafia de Sequências (Severiano Ribeiro, 2001).

Os conceitos pioneiros da Estratigrafia de Sequências foram expandidos e refinados, com o avanço das pesquisas, e publicados em trabalhos como os de Vail *et al.* (1984), Vail (1987), Wilgus *et al.* (1988) e Van Wagoner *et al.* (1990).

As publicações de Wilgus *et al.* (1988) e Posamentier & Vail (1988) introduziram o uso da Estratigrafia de Sequências também para sucessões continentais. Esses autores sugeriram que a variação do nível de base e o consequente espaço de acomodação controlavam a deposição aluvial, extrapolando assim, a aplicação da estratigrafia de sequências para um contexto continental. A preservação dos depósitos fluviais, segundo Holz (2012) é controlada, principalmente, pela criação do espaço de acomodação.

Nesse contexto, diversos autores apresentaram modelos detalhados sobre o tema. Wright & Marriot (1993) foram pioneiros nos estudos sobre a relação entre o espaço de acomodação e a sedimentação fluvial. Esses autores associaram as variações do nível de base e do espaço de acomodação subaéreo com a arquitetura fluvial e o desenvolvimento de paleossolos.

Desta forma, Wright & Marriot (1993) elaboraram um modelo que apresenta três tratos de sistemas. O trato de sistemas de nível baixo é caracterizado por pouco espaço de acomodação e por canais amalgamados, de granulometria mais grossa. Neste trato há formação de paleossolos maduros e bem drenados. O trato de sistemas transgressivo inicial apresenta uma crescente, mas baixa taxa de acomodação, sendo por isso, também caracterizado por canais arenosos amalgamados e geração de solos hidromórficos. Durante o trato de sistemas transgressivo tardio há aumento na taxa de acomodação resultando em corpos de canais isolados e desenvolvimento incipiente de solos bem drenados. Por fim, no trato de sistemas de nível alto ocorre uma rápida diminuição do espaço de acomodação, favorecendo o melhor desenvolvimento de solos e geração de canais amalgamados.

Para Scherer *et al.* (2008) em sistemas fluviais, o espaço de acomodação está associado ao nível relativo do mar, mas principalmente ao perfil de equilíbrio, o qual se comporta de maneira distinta de acordo com a distância do sistema da linha de costa.

Em sistemas fluviais acumulados próximo à linha de costa, o nível do mar é o fator dominante sobre o comportamento do perfil de equilíbrio, desta forma, a

sedimentação fluvial, assim como a marinha, obedecerão a curva sinusoidal de variação eustática, podendo ser definidos três tratos de sistemas: de nível baixo, transgressivo e alto (Scherer *et al.* 2008).

Já, em sistemas fluviais acumulados distante da linha de costa, o clima, a tectônica e o influxo sedimentar apresentam mais controle do que o nível do mar sobre comportamento do perfil de equilíbrio fluvial (Blum & Törnqvist 2000). Por isso, diversos autores acham equivocado o uso das terminologias dos tratos de sistemas e das superfícies limítrofes em sucessões continentais.

Desta forma, atualmente, a maioria dos autores prefere utilizar a denominação de tratos de sistemas de Alta e Baixa acomodação. Essas denominações foram introduzidas por Dahle *et al.* (1997) e aplicadas por Martinsen *et al.* (1999). O trabalho deste último autor foi um marco para a definição de unidades estratigráficas não marinhas.

Martinsen *et al.* (1999) reconheceram apenas dois tratos para as sequências fluviais: o trato de sistemas de baixa acomodação, caracterizado pelo rebaixamento do nível de base, alta razão areia/lama e por canais fluviais amalgamados; e o trato de sistemas de alta acomodação, formado durante a elevação do nível de base, e conseqüente aumento do espaço de acomodação e abundante ocorrência de sedimentos de planície de inundação. Esses tratos são delimitados pelos limites de sequências e por uma superfície de expansão, a qual é distinguida pelo predomínio de fácies pelíticas.

Para a análise estratigráfica da Seção Siluriana da Bacia do Parnaíba, foco deste trabalho, foram utilizadas as terminologias clássicas da Estratigrafia de Sequências disseminadas por Vail *et al.* (1977), em que a sequência deposicional, unidade fundamental, apresenta um arranjo tripartite. No entanto, na denominação dos tratos de sistemas foi adotado o termo "nível de base" em lugar de "nível do mar" como utilizado no modelo clássico, visando abranger os depósitos fluviais presentes na seção estudada. Foram utilizadas, ainda neste trabalho, as terminologias alto, moderado e baixo espaço de acomodação, termos adaptados dos conceitos defendidos por Dahle *et al.* (1997), Martinsen *et al.* (1999), entre outros.

ANÁLISE 1D

A análise 1D da Seção Siluriana foi realizada a partir de um estudo detalhado dos perfis litológicos associados aos de raios gama, aliado a consultas às pastas dos

poços. O estudo deste conjunto de dados permitiu a caracterização de litofácies, de acordo com a assinatura nos perfis de raios gama, bem como possibilitou o reconhecimento dos sistemas deposicionais, conforme descrito na literatura.

A análise da relação vertical das litofácies, identificadas anteriormente, possibilitou a caracterização de ciclos sedimentares de acordo com as tendências de variação textural, sejam de afinamento ou de engrossamento textural para o topo. Esses ciclos foram, posteriormente, agrupados em conjuntos de ciclos, com base nos padrões de empilhamento, progradacional ou retrogradacional, e posteriormente associados a tratos de sistemas.

O início da Sequência Siluriana é assinalado pela deposição dos depósitos fluviais da Formação Ipu que encontram-se sobrepostos discordantemente ao embasamento (Figura 3). Nos poços estudados, este intervalo é caracterizado por espessos pacotes de arenito intercalados com delgados níveis de folhelho (Figura 3).

Este intervalo fluvial culmina em um nível de pelito de plataforma rasa, camada mais basal da unidade sobreposta, a Formação Tianguá, onde foi posicionada a Superfície Transgressiva (ST; Figura 3). Esta superfície representa a primeira incursão marinha desta sequência e registra o afogamento dos depósitos fluviais com influência glacial da Formação Ipu. A todo este intervalo, que possui como limite inferior uma discordância angular no topo do embasamento (cristalino ou metassedimentar) e acima a ST, foi associado ao Trato de Sistemas de Nível Baixo (TSNB; Figura 3).

O TSNB, nos poços estudados, exibe em sua porção inferior vários estratos de arenito amalgamados, e na porção superior intercalações mais frequentes de folhelhos. Tal fato tornou possível reconhecer, na maioria dos poços estudados, dois conjuntos de ciclos, denominados de conjunto de ciclos com baixo espaço de acomodação, relacionado à porção inferior, e conjunto de ciclos com moderado espaço de acomodação, relativo à porção superior do TSNB. Desta forma, este trato de sistemas pôde ser compartimentado em dois intervalos, nomeados neste trabalho, por TSNB precoce e TSNB tardio (Figura 3).

O TSNB precoce é caracterizado pela baixa, mas crescente, taxa de criação do espaço de acomodação, a qual favorece a geração de corpos arenosos amalgamados de granulometria grossa. Por sua vez, o TSNB tardio apresenta um aumento gradual na taxa de criação do espaço de acomodação, e em decorrência disso, os depósitos de

canais fluviais tornam-se, gradativamente, mais intercalados a depósitos de granulação fina de planície de inundação.

Sobrepostos ao TSNB ocorrem depósitos marinhos rasos, pertencentes à porção inferior e intermediária da Formação Tianguá que compõem ciclos de engrossamento textural para o topo com fácies pelíticas marinhas (folhelhos e/ou siltitos) na base, que gradam para o topo para delgadas camadas de arenito fino marinho raso. Estes ciclos se agrupam para formar um conjunto de ciclos com alto espaço de acomodação (Figura 4). É nítida, em todos os poços estudados, uma tendência marcante de aumento na quantidade de pelitos para o topo, juntamente com a diminuição da quantidade de camadas de arenito e um aumento expressivo nos valores de raios gama (Figura 4). Todo este intervalo registra uma importante fase transgressiva e foi associado ao segundo trato de sistemas da sequência estudada, o Trato de Sistemas Transgressivo (TST).

Esta tendência de aumento na radioatividade nos perfis de raios gama, devido, basicamente a maior quantidade matéria orgânica nos pelitos, culmina em um nível de folhelho que representa a maior expansão dos depósitos marinhos em direção ao continente; neste nível de folhelho foi posicionada a Superfície de Máxima Inundação (SMI). Desta forma, o TST é limitado, em sua porção basal, pela Superfície Transgressiva e, no topo, pela SMI (Figura 4).

A partir da SMI, os valores de raios gama começam a diminuir e os ciclos passam gradativamente a conter uma quantidade maior de arenitos, dando início a uma fase regressiva. Esta fase começa com os depósitos marinhos da porção superior da Formação Tianguá e se estende até os depósitos fluviais da Formação Jaicós (Figura 5). Todo este intervalo foi associado ao Trato de Sistemas de Nível Alto (TSNA; Figura 5).

A exemplo do TSNB, o TSNA também pôde ser compartimentado em dois intervalos, denominados de TSNA precoce e TSNA tardio, de acordo com os tipos de conjuntos de ciclos presentes. A porção inferior deste trato de sistemas, associado ao TSNA precoce, é marcado por um conjunto de ciclos com moderado espaço de acomodação, caracterizado pela ocorrência de camadas de arenito intercaladas com níveis delgados de folhelho, que foram interpretados como depósitos de canais fluviais dispersos entre depósitos de granulometria fina de planície de inundação (Figura 5). Já, a porção superior, referente ao TSNA tardio, exibe uma maior quantidade de camadas

de arenito amalgamadas, com subordinados níveis de pelito (Figura 5). Este intervalo é representado por um conjunto de ciclos com baixo espaço de acomodação.

Este trato de sistemas e toda a Sequência Siluriana se encerram com a Discordância Eodevoniana, que constitui o limite superior desta sequência, e a limita com a Sequência Mesodevoniana/Eocarbonífera, sobreposta.

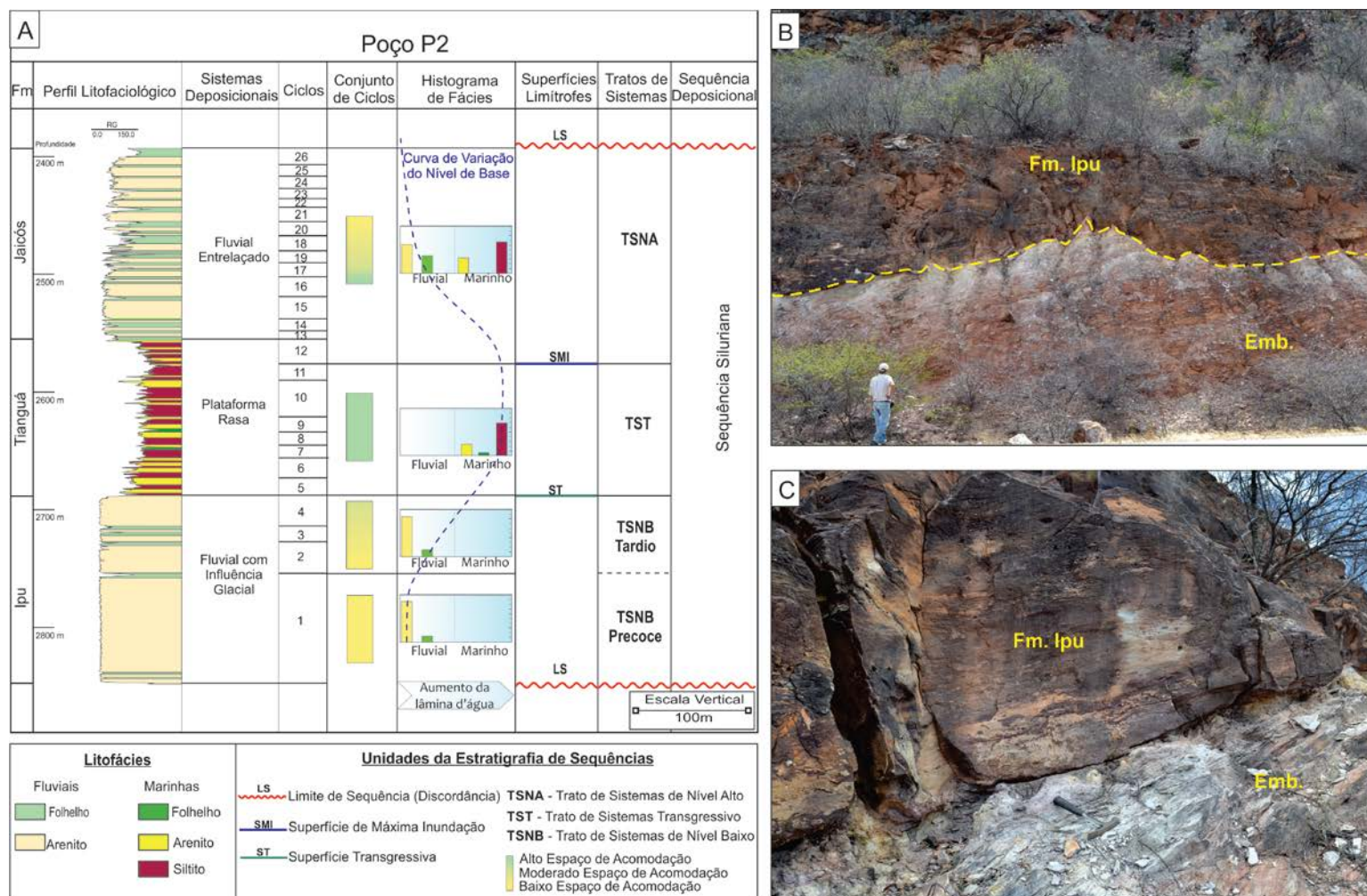


Figura 3: (A) Diagrama 1D do poço P2 do intervalo correspondente à Sequência Siluriana. Em (B) e (C) Arenitos da Formação Ipu, pertencentes ao TSNB, em discordância sobre o embasamento.

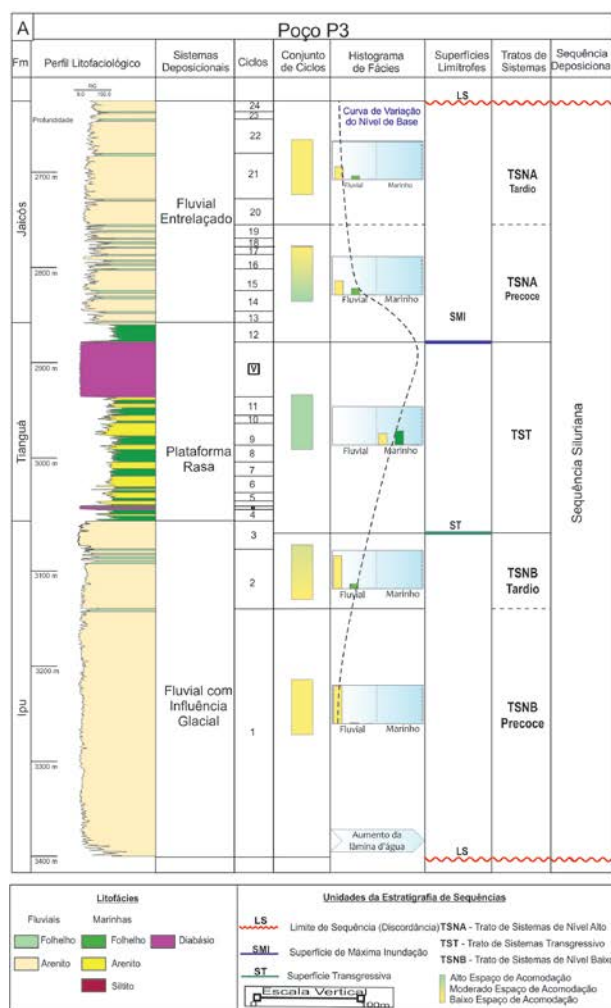


Figura 4: (A) Diagrama 1D do Poço P5 do intervalo correspondente a Sequência Siluriana. Em (B) Arenitos da Formação Ipu pertencentes ao TST. (C) Tilitos contendo seixos facetados.

ANÁLISE 2D

A análise 2D da Sequência Siluriana na Bacia do Parnaíba consistiu na interpretação de três linhas sísmicas, situadas na porção centro norte da bacia, as quais contêm alguns dos poços estudados anteriormente, bem como na confecção de um seção estratigráfica esquemática (Figura 1).

A análise sismoestratigráfica compreendeu o reconhecimento dos refletores associados às superfícies chaves da Estratigrafia de Sequências, tomando como base aquelas definidas durante a análise 1D. Embora as discordâncias sejam, normalmente, reconhecidas pelas terminações em *onlap*, *toplap* ou truncamento erosional, e as superfícies de máxima inundação por terminações em *downlap* e truncamento aparente, não foi possível o reconhecimento destas terminações nas linhas estudadas.

Os refletores, que ocorrem internamente às superfícies mapeadas se mostram, na maioria das vezes, pouco expressivos e descontínuos, compatíveis com a quantidade de arenitos presentes na seção estudada. Isso permitiu que toda Seção Siluriana pudesse ser diferenciada da sequência sobreposta (Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera), já que essa, de maneira geral, exhibe refletores contínuos e de mais alta amplitude. Predominam as sismofácies de configuração paralela e subparalela cujos refletores se mostram, em geral, descontínuos (Figuras 6 e 7).

O limite inferior da sequência (LS) corresponde ao topo do embasamento. Esta superfície foi assinalada, na maioria dos casos, com base em amarrações sísmica-poços. Todavia, nos casos em que os poços não atingiram o embasamento, esse limite foi marcado no último refletor bem definido da linha sísmica onde há grande variação de impedância acústica causada pelo contato entre rochas metamórficas e sedimentares (Figuras 6 e 7).

A Superfície Transgressiva (ST) foi bem caracterizada nas linhas analisadas. Essa Superfície foi demarcada, de acordo com a amarração sísmica-poço, no topo da Formação Ipu, onde o coeficiente de reflexão é positivo devido a passagem da onda sísmica de uma camada com menor para uma com maior velocidade (Figuras 6 e 7).

Acima da Superfície Transgressiva foi definida a Superfície de Máxima Inundação (SMI). Sabe-se que essa superfície cronoestratigráfica representa transgressão dos sedimentos marinhos por sobre os sedimentos fluviais da Formação

Ipu sotoposta e marca a mudança do padrão de empilhamento dos conjuntos de ciclos de retrogradacional para progradacional. No entanto, nas linhas sísmicas analisadas, essa superfície revelou-se de difícil reconhecimento, na maioria das vezes, somente podendo ser bem caracterizada nas proximidades dos poços devido a ausência de um significativo contraste de impedância acústica, uma vez que se encontra no meio de um intervalo rico em pelitos (Figuras 6 e 7).

O limite superior da Sequência corresponde à passagem das formações Jaicós e Itaim, sendo representado pela discordância Eodevoniana (Figuras 6 e 7). Nos dados sísmicos, essa superfície apresenta baixo contraste de impedância acústica, que deve-se a ocorrência, acima e abaixo da mesma superfície, de arenitos pertencentes às formações Jaicós e Itaim, respectivamente. Entretanto, como mais acima deste limite ocorre um intervalo onde os refletores se mostram bastante expressivos e contínuos, os quais foram interpretados como correspondentes às rochas pelíticas da Formação Pimenteiras, foi possível assinalar com precisão este limite (Figuras 6 e 7).

Desta forma e em seguida, a definição das superfícies estratigráficas a partir dos dados sísmicos possibilitou a delimitação dos tratos de sistemas. Sendo assim, o intervalo definido entre o limite inferior da Sequência (que corresponde ao topo do embasamento) e a Superfície Transgressiva foi associado ao Trato de Sistemas de Nível Baixo; aquele entre as superfícies Transgressiva e de Máxima Inundação foi correlacionado ao Trato de Sistemas Transgressivo; e o último intervalo, que abrange a porção situada entre a Superfície de Máxima Inundação e o limite superior da Sequência (Discordância Eodevoniana) foi assinalado como o Trato de Sistemas de Nível Alto (Figuras 6 e 7).

Não foi possível através da interpretação sismoestratigráfica compartimentar os tratos de sistemas de nível baixo e alto em precoce e tardio, assim como realizado mediante análise 1D, pois tais intervalos têm pequena espessura, não podendo ser visualizados em escala sísmica.

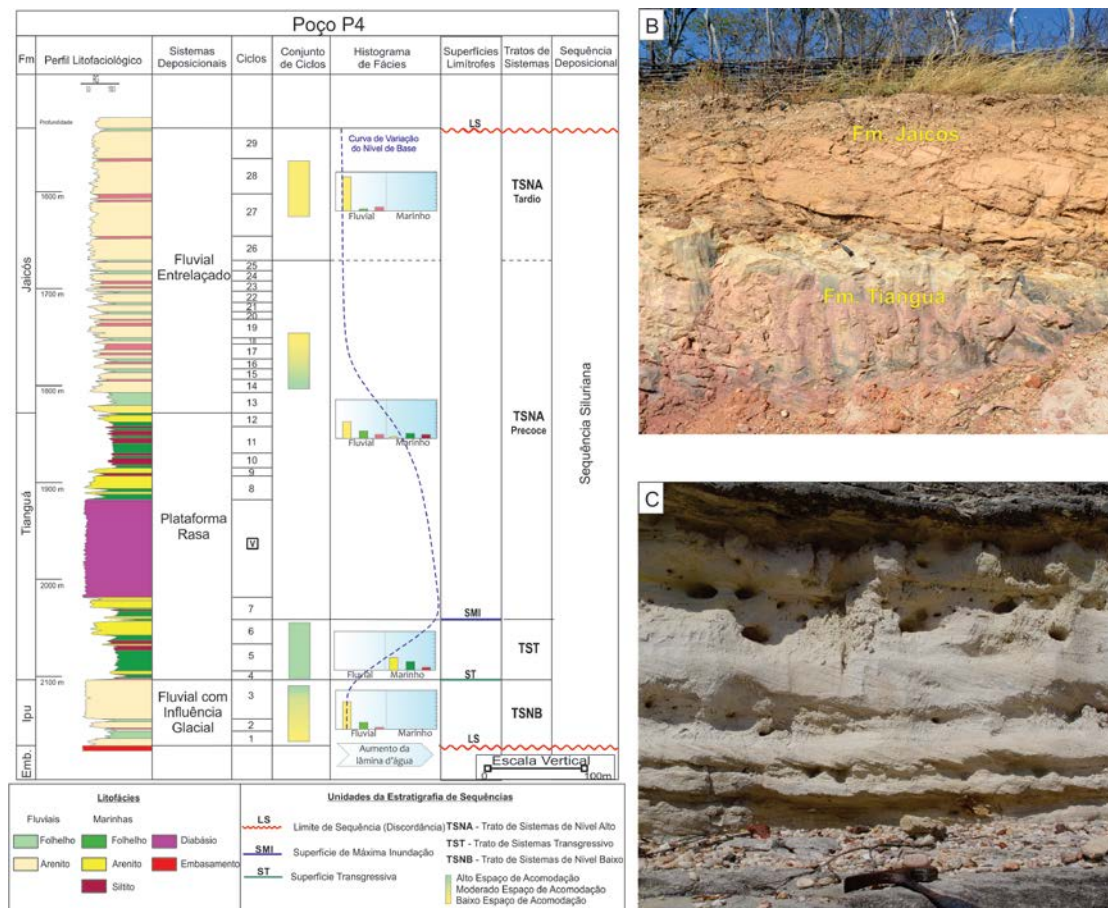


Figura 5: (A) Diagrama 1D do Poço P1 do intervalo correspondente à Sequência Siluriana. Em (B) Contato entre os litótipos das formações Tianguá e a Jaicós correspondentes ao TSNA. Em (C) Camadas tabulares de arenito com estratificação cruzada tabular da Formação Jaicós.

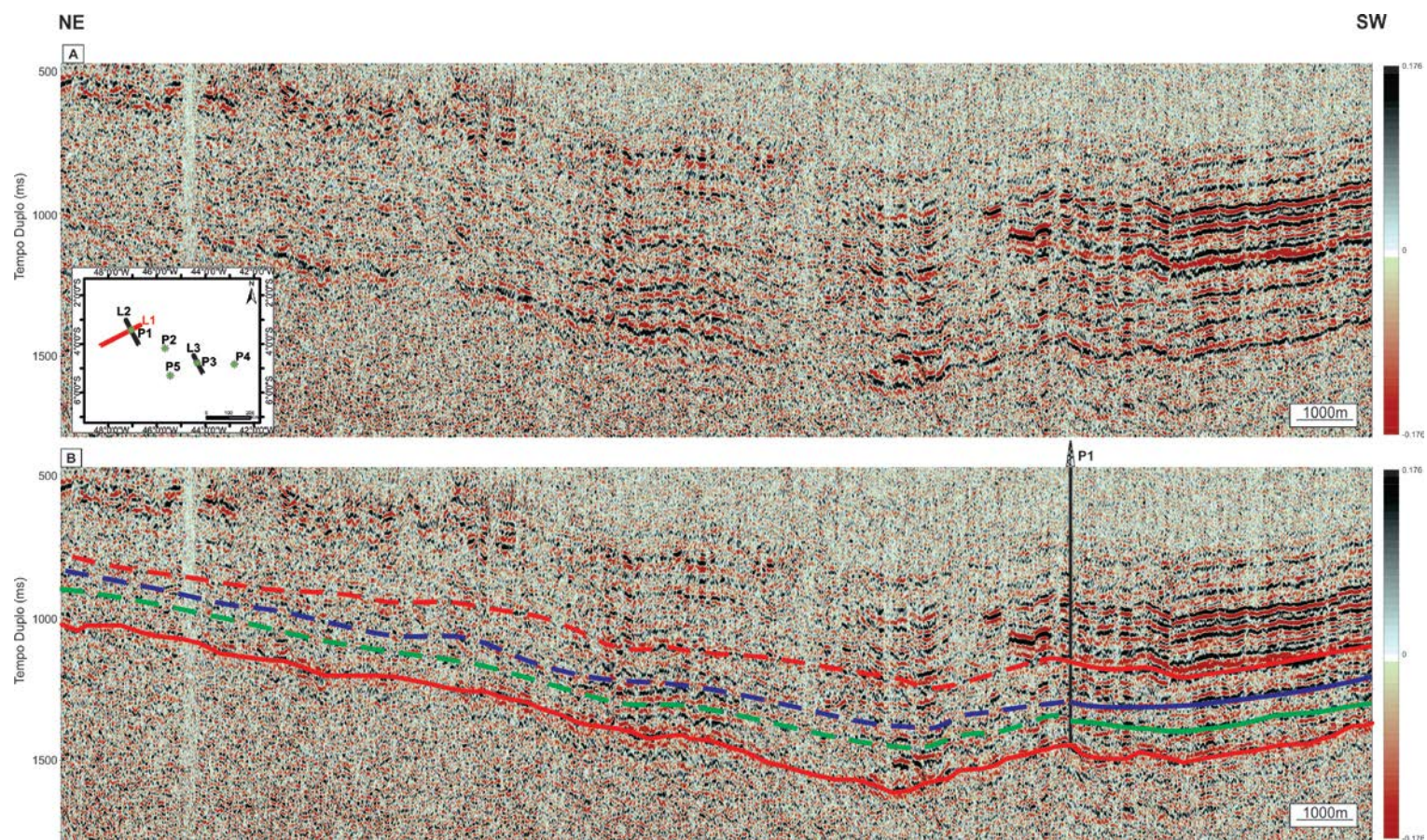


Figura 6: Linha Sísmica 1 não interpretada (A) e interpretada (B) apresentando as superfícies cronoestratigráficas identificadas na análise 1D. Em vermelho os Limites da Sequências (LS); em verde a Superfície Transgressiva (ST) e em azul a Superfície de Máxima Inundação (SMI).

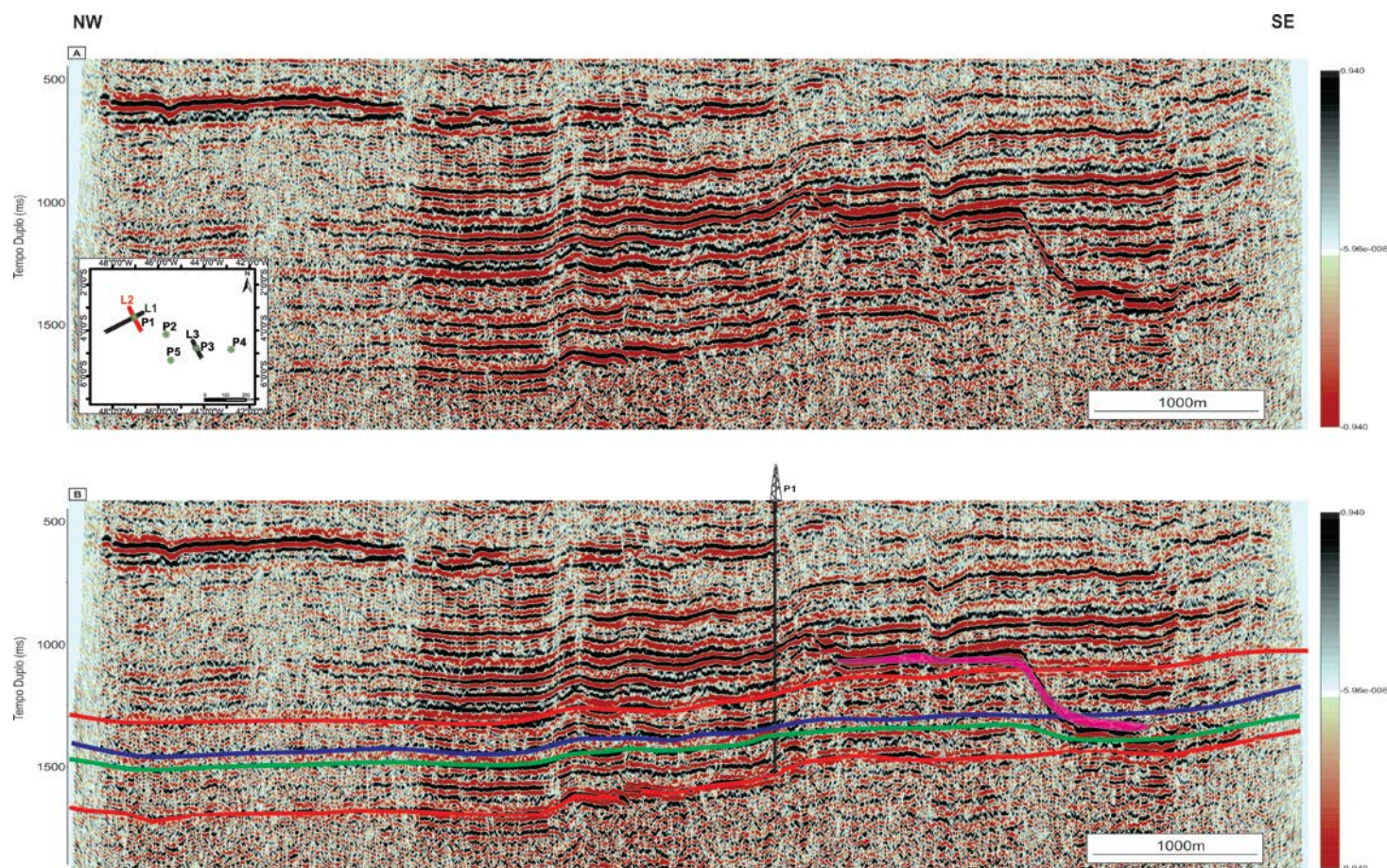


Figura 7: Linha Sísmica 2 não interpretada (A) e interpretada (B) apresentando as superfícies cronoestratigráficas identificadas na análise 1D. Em vermelho os Limites da Sequências (LS); em verde a Superfície Transgressiva (ST) e em azul a Superfície de Máxima Inundação (SMI). Em cor rosa destaque para a ocorrência de corpos de diabásio.

Análise da Seção Estratigráfica

A análise estratigráfica 2D compreendeu, além da interpretação sísmica contemplada anteriormente, a confecção de uma seção estratigráfica esquemática com direção NW-SE, com base no reconhecimento das superfícies estratigráficas e unidades genéticas definidas durante a análise 1D (Figura 8). A seção elaborada, apesar de ser somente esquemática, é importante para a obtenção de um melhor entendimento acerca do preenchimento sedimentar das unidades estratigráficas de interesse.

A seção estratigráfica elaborada correlaciona quatro dos cinco poços estudados (P1, P2, P3 e P4) e teve a Superfície de Máxima Inundação (SMI) escolhida como *datum* em virtude de sua representatividade na seção estudada, já que representa a transgressão dos sedimentos marinhos continente adentro. O TSNB é o intervalo mais espesso da sequência sendo caracterizado, em sua porção inferior, por espessas camadas de arenito fluvial, que se dispõem de forma amalgamada e vão se adelgaçando em direção ao topo e dando lugar a pacotes cada vez mais frequentes de folhelho fluvial.

O TST apresenta, aproximadamente, mesma espessura ao longo de toda a seção, e é assinalado pela ocorrência de litótipos marinhos atestando o padrão retrogradacional deste intervalo.

Por fim, o TSNA apresentam em sua porção inferior, grande quantidade de delgadas camadas de folhelho fluvial intercalados a camadas de arenitos. Neste intervalo ocorrem também corpos de diabásio, presentes nos poços P3 e P4. Na porção superior do TSNA a quantidade de folhelhos diminui, ao passo que aumenta-se a espessura das camadas de arenito, que tornam-se novamente amalgamadas, atestando uma diminuição do espaço de acomodação.

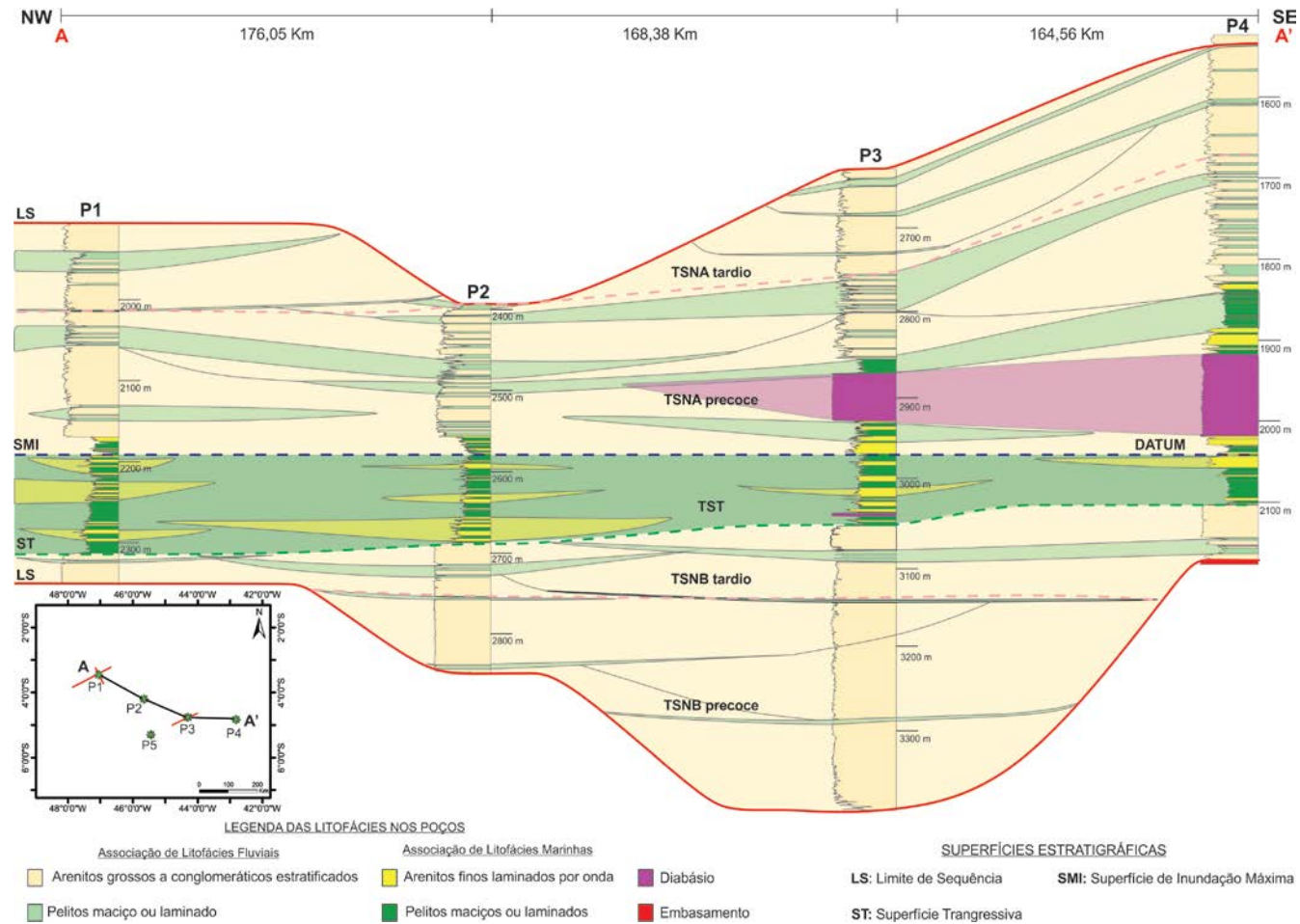


Figura 8: Seção esquemática NW-SE de correlação dos poços P1, P2, P3 e P4 mostrando os cinco intervalos reconhecidos: TSNB precoce, TSNB tardio, TST, TSNA precoce e TSNA tardio; e ilustrando, de maneira esquemática, a arquitetura deposicional dos depósitos fluviais e marinhos.

MODELOS ESTRATIGRÁFICOS EVOLUTIVOS

A Sequência Siluriana corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Serra Grande, o qual é composto pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. Essa sequência é delimitada na base e no topo pelas discordâncias Pré-Siluriana e Eodevoniana que a separam das rochas do embasamento cristalino ou metassedimentar e do Grupo Canindé, respectivamente.

A sequência inicia-se com a deposição do TSNB precoce (Figura 9A), o qual equivale aos litótipos mais basais da Formação Ipu, e representa espessos pacotes de arenito com folhelhos e siltitos subordinados. As litofácies que compõem esse trato definem apenas um conjunto de ciclos com baixo espaço de acomodação.

O TSNB tardio (Figura 9B) situa-se sobre o TSNB precoce. Esse intervalo é representado por espessos pacotes de arenito fluvial e delgadas camadas de folhelho, cuja deposição indica o início do aumento gradual na taxa de variação do espaço de acomodação. O TSNB tardio se encerra na Superfície Transgressiva (ST), a qual representa a primeira incursão marinha na bacia e assinala o momento em que o nível de base começa a subir. A partir desta superfície tem-se o início da deposição do Trato de Sistemas Transgressivo (TST).

O TST (Figura 9C) corresponde às porções inferior e intermediária da Formação Tianguá, as quais são compostas por camadas de folhelho e siltito marinhos rasos, intercalados com delgadas camadas de arenito também marinho. Esse trato é definido por um conjunto de ciclos com alto espaço de acomodação que se estende até a Superfície de Máxima Inundação (SMI). Essa superfície é representada por um nível de maior radioatividade nos perfis de raios gama. A partir da mesma dá-se o início da sedimentação do Trato de Sistemas de Nível Alto (TSNA).

O TSNA precoce (Figura 9D) é constituído pelos litótipos da porção superior da Formação Tianguá e pelos depósitos mais basais da Formação Jaicós. Este intervalo é caracterizado por pacotes de arenito, inicialmente marinho, o qual grada para arenitos de origem fluvial, intercalados com delgadas camadas de folhelho e/ou siltito, que igualmente passam de marinhos para fluviais, indicando, assim, o início da diminuição gradual na taxa de variação do espaço de acomodação.

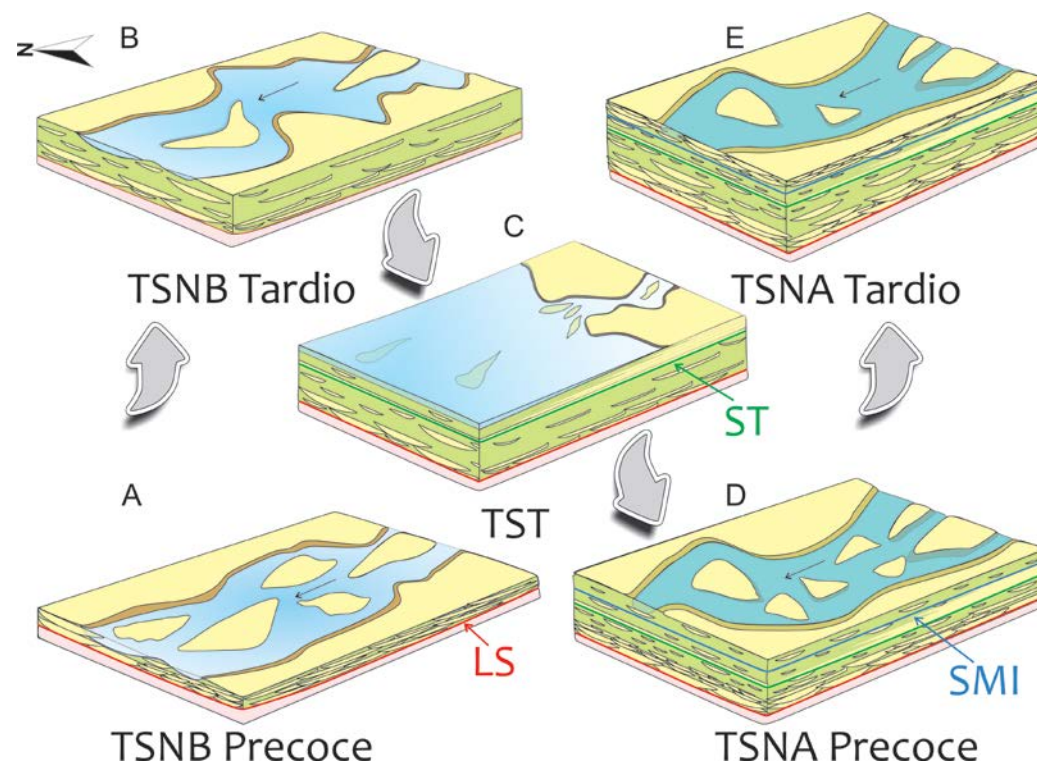


Figura 9: Modelos estratigráficos idealizados que representam a evolução da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba. (A) Trato de Sistemas de Nível Baixo Precoce; (B) Trato de Sistemas de Nível Baixo tardio; (C) Trato de Sistemas Transgressivo; (D) Trato de Sistemas de Nível Alto precoce e (E) Trato de Sistemas de Nível Alto tardio. Os blocos diagramas foram orientados com base em dados de paleocorrentes as quais indicam direção de fluxo noroeste, para os sistemas fluviais.

A Sequência Siluriana se encerra com a deposição do TSNA tardio (Figura 9E). Este intervalo corresponde à porção superior da Formação Jaicós e é composto por espessas camadas de arenito fluvial, intercaladas a delgadas e subordinadas camadas de folhelho e siltito. O TSNA tardio é caracterizado por um conjunto de ciclos com baixo espaço de acomodação e se encerra no próprio limite superior da Sequência (LS), o qual equivale à Discordância Eodevoniana.

CARTA ESTRATIGRÁFICA

Com base na análise estratigráfica realizada, 1D e 2D, e nos modelos evolutivos elaborados, foi possível propor um detalhamento da carta estratigráfica atual (Vaz *et al.* 2007) para a Sequência Siluriana, a qual é representada na figura 3.4. Esta carta exhibe as discordâncias limites, a Superfície Transgressiva e de Máxima Inundação (ST e SMI, respectivamente), além dos tratos de sistemas reconhecidos para a seção estudada.

A Sequência Siluriana, como ilustrada na carta proposta, é delimitada abaixo por uma discordância angular bastante expressiva, que separa os sedimentos da bacia, das rochas ígneas e metamórficas do embasamento.

As relações laterais entre as litofácies foram definidas com base em dados de paleocorrentes, os quais indicam direção de fluxo fluvial para noroeste (Figura 9). Desta forma, o TST foi representado por um pacote pelítico mais espesso em noroeste e vai se adelgaçando em direção a sudeste (Figura 10). Esta geometria está de acordo com o que foi observado na seção estratigráfica elaborada (Figura 8).

A Sequência encerra-se com uma discordância pouco significativa, nos dados analisados, que separa a Seção Siluriana da Sequência Meso Devoniana-Eo Carbonífera, sobreposta.

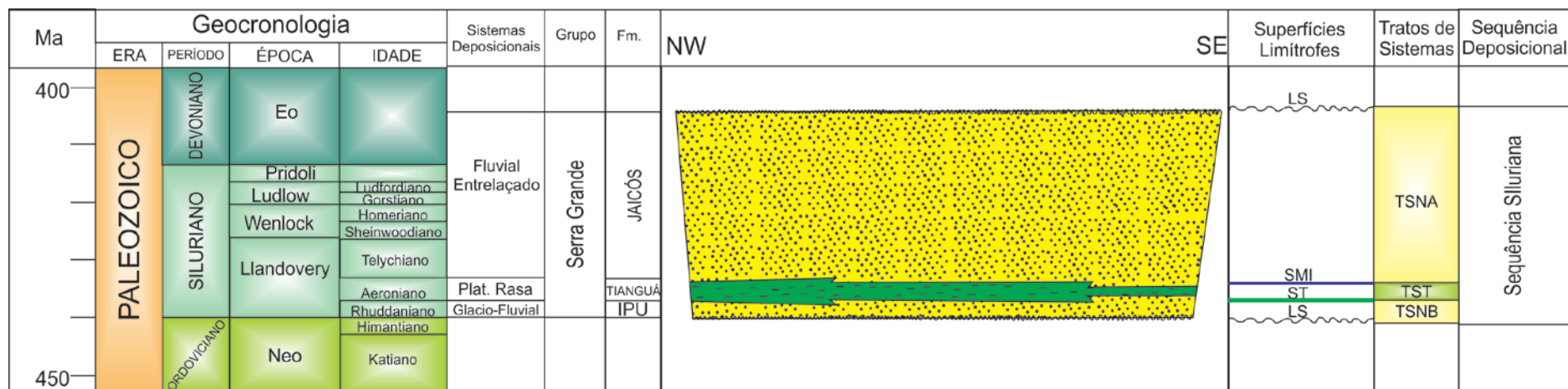


Figura 10: Carta Estratigráfica Simplificada da Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, elaborada com base nos dados utilizados neste trabalho.

CONCLUSÕES

A aplicação da estratigrafia de sequências à Sequência Siluriana da Bacia do Parnaíba, que inclui depósitos fluviais com influência glacial, além de depósitos marinhos, exigiu uma adequação nos conceitos e premissas da estratigrafia de sequências, entendendo que tal método foi concebido originalmente para ser empregado apenas em um contexto marinho. Embora muitos autores já tenham utilizado a estratigrafia de sequências para sucessões fluviais, toda a conceituação foi desenvolvida para a sedimentação exclusivamente para o ambiente marinho. Por isso, neste trabalho, adotou-se como parâmetro fundamental de controle da arquitetura estratigráfica o espaço de acomodação, o qual retrata as variações relativas do nível de base independentemente do contexto ambiental ou tectônico.

Assim, adotando-se como parâmetro de ciclicidade sedimentar o espaço de acomodação, uma fase transgressiva irá gerar um aumento gradual na taxa de criação do espaço de acomodação, ao passo que uma fase regressiva, em contrapartida, condicionará a uma diminuição gradativa neste mesmo parâmetro. Desta forma, estas tendências de aumento ou diminuição na taxa de criação do espaço de acomodação puderam ser associadas aos tratos de sistemas, que neste trabalho ainda mantiveram a denominação clássica de nível de base baixo, transgressivo e de nível de base alto.

Seguindo esta concepção, a Sequência Siluriana, que corresponde litoestratigraficamente às formações Ipu, Tianguá e Jaicós, pôde ser compartimentada em cinco intervalos de acordo com as tendências de aumento ou diminuição no espaço de acomodação, sendo estes: TSNB precoce (baixa taxa de criação do espaço de acomodação), TSNB tardio (moderada taxa de criação do espaço de acomodação), TST (alta taxa de criação do espaço de acomodação), TSNA precoce (moderada taxa de criação do espaço de acomodação) e, por fim, TSNA (baixa taxa de criação do espaço de acomodação). Este arranjo estratigráfico atesta que a evolução desta sequência é pontuada por um ciclo completo transgressivo-regressivo, onde inicialmente o espaço de acomodação aumenta e depois gradativamente diminui, arranjo este típico de sequências desenvolvidas em fase de sinéclise intracratônica.

Além disso, a caracterização destes intervalos possibilitou a identificação de rochas com potencial para geração e acumulação de hidrocarbonetos. O TSNB precoce

e o TSNA tardio, devido ao seu baixo espaço de acomodação, são melhores reservatórios do que os TSNB tardio e TSNA precoce, já que aqueles são caracterizados por corpos arenosos amalgamados que propiciam maiores acumulações de óleo e gás.

Em relação às rochas geradoras, a região de maior probabilidade de geração de hidrocarbonetos é aquela onde foi posicionada a SMI, visto que, nas proximidades desta superfície encontram-se a maior quantidade de matéria orgânica da Sequência Siluriana.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica /UFRN; ao Projeto “Geologia e Sistemas Petrolíferos da Bacia do Parnaíba” parceria entre o PPGG/UFRN e a Chevron do Brasil; e à CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa à primeira autora. Gostaríamos também de agradecer ao Professor Dr. Alex Antunes pela realização das amarrações sísmica-poços utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, G.A. de. Bacia do Maranhão: geologia e possibilidades de Petróleo. Belém: Petrobras, 55p. 1969.
- Aguiar, G.A. de. Revisão geológica da bacia paleozoica do Maranhão. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, 1971. v. 3, p. 113-122.
- Blum, M. D. & Törnqvist, T. E. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology*, 2000. v.47 p. 2-48.
- Brito Neves, B. B., Cordani, U. G. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, v. 53, p. 23-40, 1991.
- Caputo M.V., Lima E.C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. Rio de Janeiro – SBG. Anais XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2, p.740-753.
- Dahle, K.; Flesja, K.; Talbot, M. R.; Dreyer, T. Correlation of fluvial deposits by the use of Sm-Nd isotope analysis and mapping of sedimentary architecture in the Escanilla Formation (Ainsa Basin, Spain) and the Statfjord Formation (Norwegian North Sea). Abstracts, Sixth International Conference on Fluvial Sedimentology, Cape Town, South Africa, 1997, p. 46.

- Delgado, I. M.; Souza, J. D.; Silva, L. C.; Silveira Filho, N. C.; Santos, R. A.; Pedreira, A. J.; Guimarães, J. T.; Angelim, L. A. A.; Vasconcelos, A. M; Gomes, I. P.; Lacerda Filho, J. V.; Valente; C. R.; Perrotta, M. M.; Heineck, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. Brasília: 227-334p., 2003.
- Della Fávera, J.C. Fundamentos de Estratigrafia Moderna. Rio de Janeiro, Ed. UERJ. 264p., 2001.
- Góes, A.M.O.; Souza, J.M.P.; Teixeira, L.B. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 4, p. 55-64, 1990.
- Góes, A. M. O. & Feijó, F. J. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-68, 1994.
- Holz, M. Estratigrafia de Sequências: Histórico, Princípios e aplicações. Editora Interciência, 1ª Edição, Rio de Janeiro, 272 p., 2012.
- Martinsen, O. J., Ryseth, A., Helland-Hansen, W., Flesche, H., Torkildsen, G., Idil, S., Stratigraphic base level and fluvial architecture: Ericson Sandstone (Campanian), Rock Springs Uplift, SW Wyoming, USA. Sedimentology, v. 46, p. 235-259, 1999.
- Mizusaki, A. M. P, Thomaz Filho, A. “O Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil”. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito Neves, B. B. (eds). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. 1 ed. capítulo 17, São Paulo, Beca, 2004.
- Posamentier H. W. & Vail P. R. Eustatic controls on clastic deposition II – Conceptual Framework. In: Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G.St.C., Posamentier H.W., Ross C.A., Van Wagoner J.C. (eds). Sea-level Changes – An Integrated Approach. STulsa, Oklahoma: SEPM Geology, Special Publication n. 42, p. 125-154, 1988.
- Santos, R. D.; Castro, D. L. de.; Bezerra, F. H. R.; Vidotti, R. M.; Fuck, R. A.; Dantas, E. L.; Lima, T. P. C. de. Influência do Lineamento Transbrasiliano na formação do arcabouço estrutural da Bacia Parnaíba. In: 13º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2013, Rio de Janeiro, Brasil.

- Scherer, C. M. S. Ambientes Fluviais. In: Pedreira da Silva, A.J.C.L.; Aragão, M.A.N.F.; Magalhães, A.J.C. (Organizadores). Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil. Rio de Janeiro, 2008. p. 102-130.
- Severiano, Ribeiro, H.J.P. Estratigrafia de Seqüências: Fundamentos e Aplicações. São Leopoldo, RS: Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 428p., 2001.
- Vail P.R., Mitchum R.M. Jr., Todd R.G., Widmier J.M., Thompson S. III, Sangree J.B., Bubb J.N., Hatlelid W.G. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. In C.E. Payton (ed.), Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26, p. 49-212, 1977.
- Vail, P.R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure. AAPG Studies in Geology, Tulsa, v. 27, p. 1-9, 1987.
- Vail, P.R.; Hardenbol, J.; Todd, R.G. Jurassic unconformities, chronostratigraphy, and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy. Tulsa, Oklahoma: AAPG Studies in Geology, Memoir 36, p.129-144, 1984.
- Van Wagoner, J.C.; Mitchum, R.M.; Campion, K.M. & Rahmanian, V.D. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. AAPG Methods in Exploration Series, n. 7, 1990.
- Vaz, P.T.; Rezende, N.G.A.M.; Wanderley Filho, J.R.; Travassos, W.A. Bacia do Parnaíba. In: Milani, E.J.; Rangel, H.D.; Bueno, G.V.; Stica, J.M.; Winter, W.R.; Caixeta, J.M.; Pessoa Neto, O.C. (eds.) Bacias sedimentares brasileiras – cartas estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, p. 253-263, 2007.
- Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C.G.St.C.; Posamentier, H.W.; Ross, C.A. & Van Wagoner, J.C. (Eds.) Sea-level changes: an integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 42, p. 407, 1988.
- Wright, V. P.; Marriott, S. B. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. Sedimentary Geology, v. 86, p. 203-210, 1993.

3.3 Resultados Complementares

Este tópico contempla os resultados adicionais das análises dos dados de poços e sísmicos que não puderam ser inseridos no artigo científico apresentado anteriormente, devido ao espaço disponibilizado pelo periódico onde o mesmo foi submetido para publicação.

Os diagramas 1D dos poços P3 e P4 (Figuras 3.1 e 3.2), que não foram incluídos no artigo, exibem, assim como os diagramas dos demais poços, o perfil litofaciológico, os sistemas deposicionais, os ciclos e conjuntos de ciclos, o histograma de frequência de fácies, além das superfícies limítrofes e tratos de sistemas reconhecidos para a Sequência Siluriana estudada.

A linha sísmica 3 (Figura 3.3) de orientação NW-SE, mostra os refletores que foram eleitos para representar as superfícies chaves da estratigrafia de sequências e ilustrar também a distribuição lateral das unidades genéticas identificadas para a seção estudada.

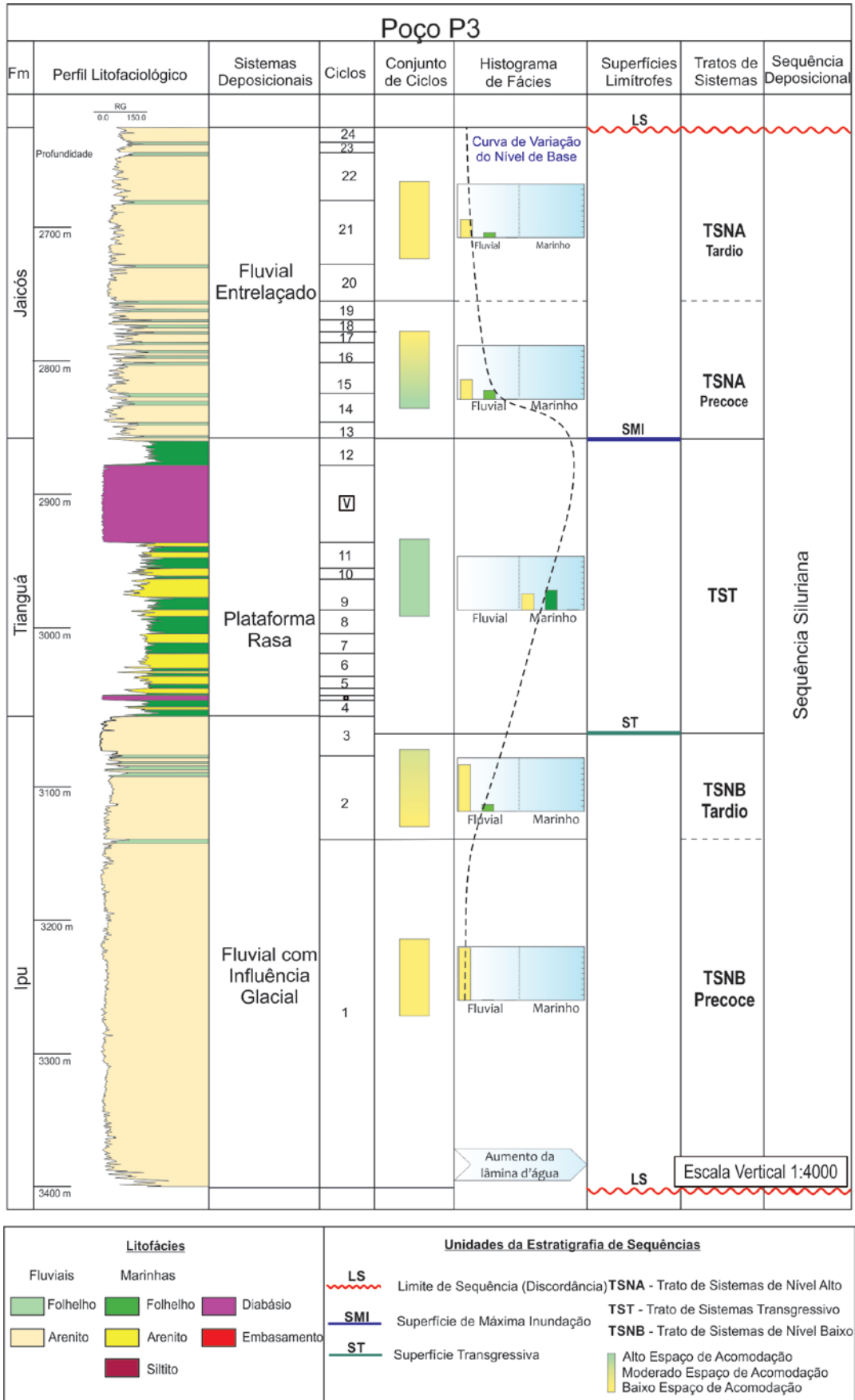


Figura 3.1: Diagrama 1D do poço P3 do intervalo correspondente à Sequência Siluriana.

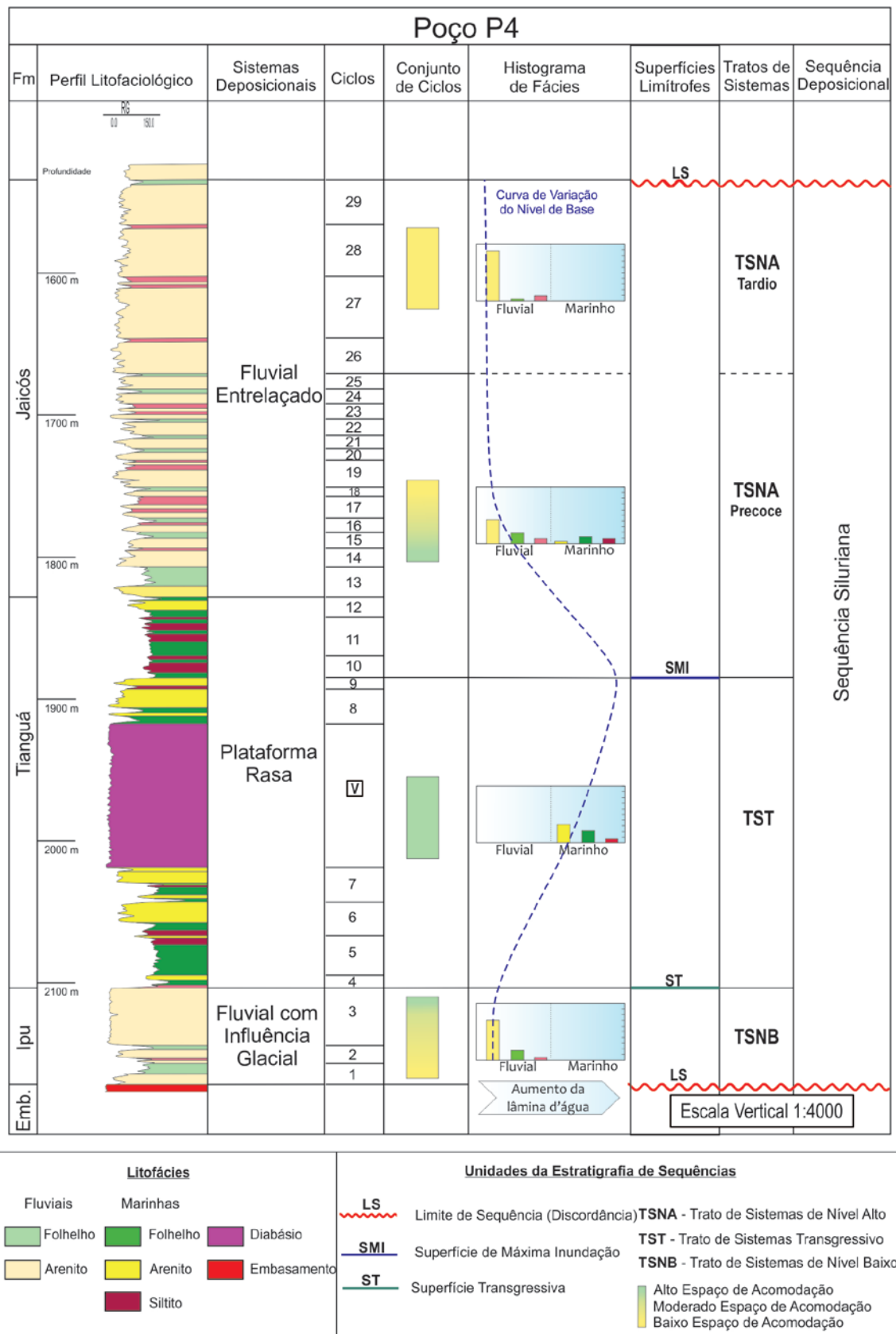


Figura 3.2: Diagrama 1D do poço P4 do intervalo correspondente à Sequência Siluriana.

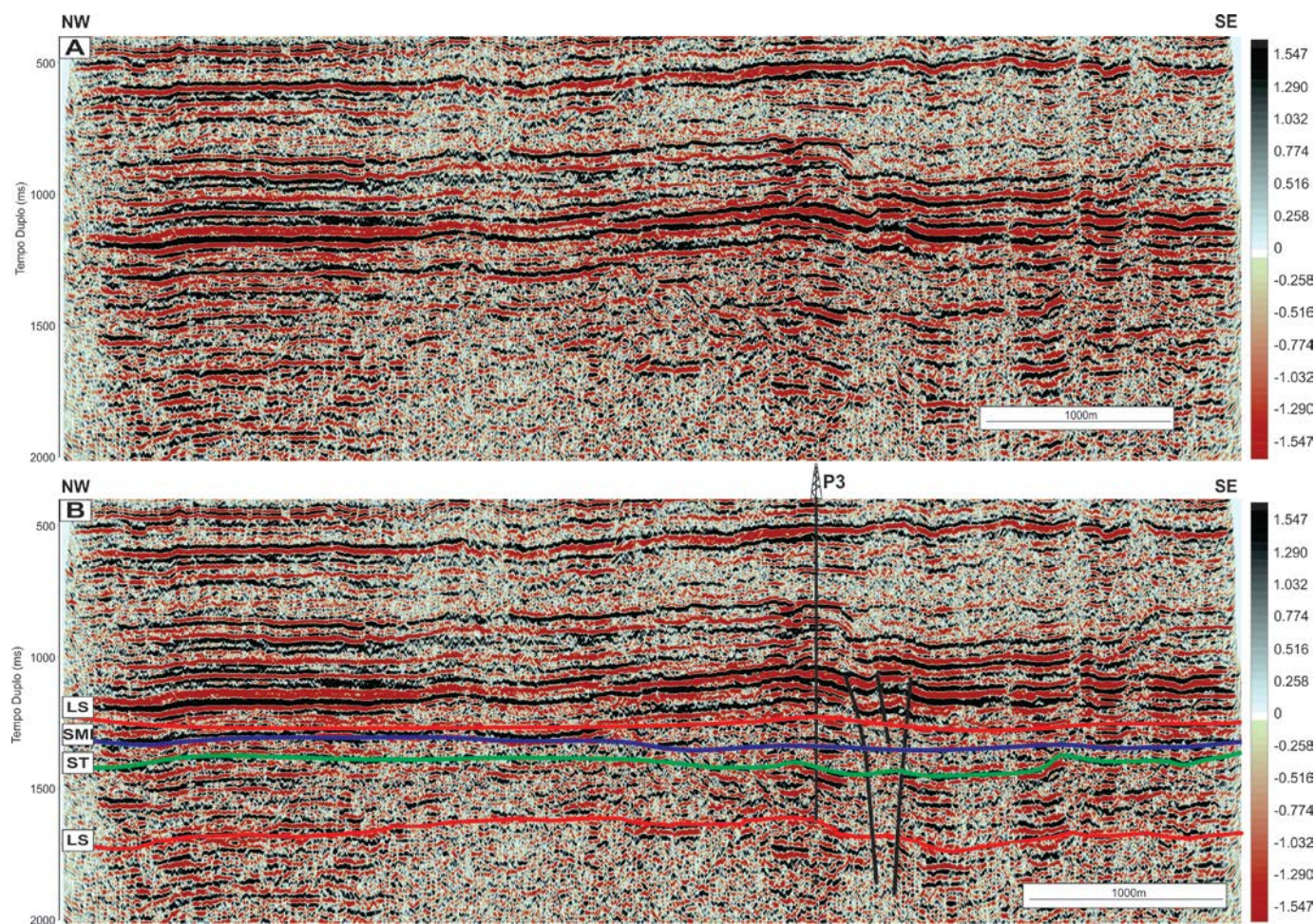


Figura 3.3: Linha Sísmica 3 não interpretada (A) e interpretada (B) apresentando as superfícies cronoestratigráficas identificadas na análise 1D. LS: Limite de Sequência; ST: Superfície Transgressiva; SMI: Superfície de Máxima Inundação.

4. Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram alcançar todos os objetivos anteriormente propostos.

A análise estratigráfica 1D possibilitou, para cada poço analisado, a caracterização das litofácies, de acordo com as assinaturas dos perfis de raios gama, dos sistemas deposicionais, segundo descritos na literatura, além da identificação dos ciclos de mais alta frequência, com base nas tendências de afinamento ou engrossamento textural para o topo, e também dos conjuntos de ciclos, mediante o padrão de empilhamento: progradacional ou retrogradacional. Esses conjuntos de ciclos foram posteriormente associados aos tratos de sistemas de nível baixo, transgressivo e alto, a luz da estratigrafia de sequências.

A análise estratigráfica 2D, por sua vez, permitiu, mediante amarrações sísmica-poço, o reconhecimento de refletores associados às superfícies chaves da estratigrafia de sequências. Tais superfícies foram utilizadas, posteriormente, para a delimitação dos tratos de sistemas reconhecidos durante a análise 1D.

Ainda tendo-se como critérios as variações no espaço de acomodação, os tratos de sistemas de nível baixo e alto foram divididos em dois intervalos denominados precoce e tardio.

Desta forma, a Sequência Siluriana, pôde ser dividida em cinco intervalos, a saber: Trato de Sistemas de Nível Baixo precoce e tardio, o Trato de Sistemas Transgressivo e Trato de Sistemas de Nível Alto precoce e tardio, comprovando, desta forma, que esta sequência constitui um ciclo transgressivo-regressivo.

Referências

A

- Aguiar, G.A. de. 1969. Bacia do Maranhão: geologia e possibilidades de Petróleo. Belém: Petrobras, 55p. (Petrobras, Relatório Interno, 371).
- Aguiar, G.A. de. 1971. Revisão geológica da bacia paleozóica do Maranhão. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, Vol 3:113-122, São Paulo.

B

- Blum, M. D. & Törnqvist, T. E. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology*, 2000. v.47 p. 2-48.
- Brito Neves, B. B., Cordani, U. G. 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53: 23-40.

C

- Campbell, D.F., Almeida, L.A. & Silva, S.O. 1949. Relatório preliminar sobre a geologia da Bacia do Maranhão. Boletim do Conselho Nacional do Petróleo, Rio de Janeiro, v. 1, p1-160.
- Caputo, M. V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil*. 586 p. Thesis (Doctorate) – University of California, Santa Bárbara, 1984.
- Caputo M.V., Lima E.C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. Rio de Janeiro – SBG. Anais XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2, p.740-753.
- Carozzi, A. V. 1975. Análise ambiental e evolução tectônica sedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES. (PETROBRÁS. Série Ciência Técnica-Petróleo, nº 7)

Cunha, F.M.B. 1986. Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 107p.

Ð

Dahle, K.; Flesja, K.; Talbot, M. R. & Dreyer, T. Correlation of fluvial deposits by the use of SmNd isotope analysis and mapping of sedimentary architecture in the Escanilla Formation (Ainsa Basin, Spain) and the Statfjord Formation (Norwegian North Sea). Abstracts, Sixth International Conference on Fluvial Sedimentology, Cape Town, 1997, South Africa, 1997, p. 46.

Della Fávera, J.C., 2001. Fundamentos de Estratigrafia Moderna. Rio de Janeiro, Ed. UERJ. 264p

Delgado, I. M.; Souza, J. D.; Silva, L. C.; Silveira Filho, N. C.; Santos, R. A.; Pedreira, A. J.; Guimarães, J. T.; Angelim, L. A. A.; Vasconcelos, A. M.; Gomes, I. P.; Lacerda Filho, J. V.; Valente; C. R.; Perrotta, M. M.; Heineck, C. A. 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: Bizzi, L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M.; Gonçalves, J. H. (eds.): Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM, Brasília: 227-334.

ƒ

Góes, A. M. O. & Feijó, F. J. 1994. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-68, jan./mar.

Góes, A.M. 1995. A Formação Poti (Carbonífero Superior) da Bacia do Parnaíba. Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado, 171p.

Góes, A.M.O.; Souza, J.M.P.; Teixeira, L.B. 1990. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. *Boletim Geociências Petrobras*, 4: 55-64.

Grahn, Y. 1992. Revision of Silurian and Devonian strata of Brazil. *Palynology*, 16:35- 61.

H

Holz, M. 2012. Estratigrafia de Sequencias: Histórico, Princípios e aplicações. Editora Interciência, 1ª Edição, 272 p.

K

Kegel, W. Contribuição para o estudo do Devoniano da Bacia do Parnaíba. Rio de Janeiro: DNPM, 1953. 46 p. il. (Boletim, 141).

L

Lima, e. A. M. & Leite, J. F. Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba integração geológico-metalogenetica: relatório final da etapa III. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1978. 212 p.

M

Martinsen, O. J., Ryseth, A., Helland-Hansen, W., Flesche, H., Torkildsen, G., Idil, S., stratigraphic base level and fluvial architecture: Ericson Sandstone (Campanian), Rock Springs Uplift, SW Wyoming, USA. Sedimentology 46, 235-259, 1999.

Mizusaki, A. M. P, Thomaz Filho, A. "O Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil". In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito Neves, B. B. (eds). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. 1 ed. capítulo 17, São Paulo, Beca, 2004.

Moore, B. 1963. Geological Reconnaissance of the Southwest corner of the Maranhão Basin. Petróleo Brasileiro S. A., Região de Exploração do Norte, Belém, Brasil. Relatório Interno nº. 210, 74p.

P

Posamentier H.W. & Vail P.R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition II – sequence and systems tract models. In: Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G.St.C., Posamentier H.W., Ross C.A., Van Wagoner J.C. (eds), Sea-level Changes – An Integrated Approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, v. 42, p. 1125-154.

S

Santos, R. D.; Castro, D. L. de; Bezerra, F. H. R.; Vidotti, R. M.; Fuck, R. A.; Dantas, E. L.; Lima, T. P. C. de. Influência do Lineamento Transbrasiliano na formação do arcabouço estrutural da Bacia Parnaíba. In: 13º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2013, Rio de Janeiro, Brasil.

Santos, M. E. C. M. & Carvalho, M. S. S. (2009) – Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís. Rio de Janeiro: CPRM Serviço Geológico do Brasil – DGM/DIPALE, 215 p.

Santos, V. H. 2005. Seqüências Siluro-Devoniana e Eocarbonífera da Bacia do Parnaíba, Brasil, como análogos para a exploração de hidrocarbonetos. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Tese de Doutorado, 236p.

Scherer, C. M. S. Ambientes Fluviais. In: Pedreira da Silva, A.J.C.L.; Aragão, M.A.N.F.; Magalhães, A.J.C. (Organizadores). Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil. Rio de Janeiro, 2008. p. 102-130.n

Severiano, Ribeiro, H.J.P., (ed). 2001. Estratigrafia de Seqüências: Fundamentos e Aplicações. São Leopoldo, RS: Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 428p.

Small, H.L. Geologia e suprimento d'água no Piauí e parte do Ceará. Rio de Janeiro: Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas, série 1-D, publ. 32, 1914. 146 p.

V

Vail P.R., Mitchum R.M. Jr., Todd R.G., Widmier J.M., Thompson S. III, Sangree J.B., Bubb J.N., Hatlelid W.G. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. In C.E. Payton (ed.), Seismic stratigraphy -

- applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26:49-212
- VAIL, P.R. 1987. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure. AAPG Studies in Geology, Tulsa, 27: 1-9.
- VAIL, P.R.; Hardenbol, J.; Todd, R.G. 1984. Jurassic unconformities, chronostratigraphy, and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy. Tulsa, Oklahoma: AAPG Studies in Geology, Memoir 36, p.129-144.
- Van Wagoner, J.C.; Mitchum, R.M.; Campion, K.M. & Rahmanian, V.D. 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. AAPG Methods in Exploration Series, n. 7.
- Vaz, P.T.; Rezende, N.G.A.M.; Wanderley Filho, J.R.; Travassos, W.A. 2007. Bacia do Parnaíba. In: Milani, E.J.; Rangel, H.D.; Bueno, G.V.; Stica, J.M.; Winter, W.R.; Caixeta, J.M.; Pessoa Neto, O.C. (eds.) Bacias sedimentares brasileiras – cartas estratigráficas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15: 253-263.

W

- Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C.G.St.C.; Posamentier, H.W.; Ross, C.A. & Van Wagoner, J.C. (Eds.) 1988. Sea-level changes: an integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 42, 407 p.
- Wright, V. P.; Marriott, S. B. 1993. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. *Sedimentary Geology*, 86:203-210.