



Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Centro de Ciências Exatas e da Terra - CCET

Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA PLATAFORMA CARBONÁTICA PONTA DO
MEL, ALBO-CENOMANIANO DA BACIA POTIGUAR, NE DO BRASIL**

Autora:

Ana Karoliny Alves de Medeiros

Orientadora:

Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba

Dissertação nº 243/PPGG-UFRN

Natal-RN

Janeiro de 2020



Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Centro de Ciências Exatas e da Terra - CCET

Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA PLATAFORMA CARBONÁTICA PONTA DO MEL, ALBO-CENOMANIANO DA BACIA POTIGUAR, NE DO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada em 28 de janeiro de 2020 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 Estratigrafia de Sequências.

Comissão examinadora:

Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba (PPGG/DG/UFRN – Orientadora)

Profa. Dra. Debora do Carmo Sousa (DG/UFRN – Membro Externo)

Prof. Dr. Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann (PPGeoc/DG/UFPE – Membro Externo)

Natal-RN

Janeiro de 2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Medeiros, Ana Karoliny Alves de.

Análise estratigráfica da plataforma carbonática Ponta do Mel, Albo-Cenomaniano da Bacia Potiguar, NE do Brasil / Ana Karoliny Alves de Medeiros. - 2020.
72f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, 2020.

Orientadora: Valéria Centurion Córdoba.

1. Estratigrafia - Dissertação. 2. Estratigrafia de sequências carbonáticas - Dissertação. 3. Formação Ponta do Mel - Dissertação. 4. Albo-Cenomaniano - Dissertação. 5. Bacia Potiguar - Dissertação. I. Córdoba, Valéria Centurion. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.7

Agradecimentos

Chega a ser até difícil citar, sem prejuízo de nomes, todas as pessoas que durante esses anos desempenharam papel fundamental na minha jornada até aqui. Agradeço, acima de tudo, a Deus por nunca, em nenhum momento sequer, ter desistido da minha pessoa. Em segundo lugar, agradeço a duas pessoas que foram e são tudo para mim, mas hoje não se encontram mais aqui. À vocês, Wilka e Wilson, que se alegraram tanto com a minha aprovação no mestrado, que me incentivaram tanto ao longo da minha vida, me apoiaram e estiverem sempre ao meu lado, que me criaram, me educaram, formaram e me deram um lar, formado por pessoas que amo e cuido para sempre, eu sou inteira gratidão e uma saudade que jamais terá fim.

Agradeço também à professora Valéria Centurion Córdoba, quem, durante muito tempo, senti como uma mãe. Por esse e diversos tantos outros motivos que a agradeço, antes de qualquer coisa, pela oportunidade dada, ainda durante a graduação. Agradeço pelas nossas conversas, pelos aprendizados, as monitorias, tudo foi demasiadamente importante para mim e, com isso, quero que saiba que, além do agradecimento, tenho um grande respeito e, sobretudo, admiração pelo que representa para os seus alunos e pela profissional tão importante que é.

Um dos meus maiores agradecimentos, senão o maior de toda a minha vida, destino às pessoas que mais se fizeram presentes nela, às pessoas que mais me entendem, me apoiam e me amam, sem distinção alguma – a minha família. Vocês enfrentaram tudo comigo, me viram crescer, me educaram, me deram um lar e mostraram o real significado dessa palavra: família, amor. À minha tia, minha madrinha e minha eterna irmã novamente, eu agradeço todos os dias por eu ter tido a sorte de viver com vocês, que nunca mediram esforços algum para me ver feliz. Agradeço à minha mãe pelos esforços que já passou para que eu estivesse hoje aqui, além dos meus irmãos, os quais amo incondicionalmente e espero poder ser mais presente. Eu não poderia esquecer de alguém que é tão especial para mim e hoje é também a minha família. Obrigada por tudo, Larissa, por ter estado presente quando estive só e por me ajudar sempre que me vejo precisando. Quero que saiba que pode contar comigo para tudo. Amo você, Mari e Teca demais e não vou soltar a mão de vocês. Pode acreditar.

Eu preciso agradecer também aos meus companheiros de jornada, aos meus amigos da geologia e da geoquímica pelos momentos compartilhados e que sempre me alegraram diariamente. Por isso, agradeço, em especial, a Robson, Wagner, Marília, a Emerson Teles por sempre perguntar como eu estou e me fazer sorrir, a Letícia pela amizade construída há anos e por permanecer sempre ao meu lado, não importando distância. Agradeço também a todos os meus amigos do Laboratório de Geologia e Geofísica do Petróleo da UFRN, Carla, João,

Bárbara, Luanny, Gabriel, Paulo, Reinaldo pela ajuda de sempre, desde a qualificação, a Erlanny e Roanny por terem alegrado os dias na sala 2 e também a Dona Léia pela convivência, solicitude e alegria de todas as manhãs no laboratório.

Agradeço ainda à professora Debora pela amizade construída desde os tempos de graduação, pela troca de conhecimento, sugestões e também pelo apoio de sempre, o qual foi de suma importância para sentir que estava no caminho certo. Agradeço também pelo convite aceito em compor essa banca e contribuir de forma fundamental.

Esses agradecimentos se estendem ao Professor Dr. Virgínio por engrandecer de forma substancial a comissão avaliadora dessa dissertação. Obrigada pelo convite aceito.

Por fim, agradeço à todos que, direta ou indiretamente, participaram dessa minha jornada.

*“Quando você sente medo, do teu lado eu estou
E é bom que você saiba que eu sinto a tua dor
Nunca, nunca se esqueça que o mar posso acalmar
E que eu sei o tempo certo da vitória te entregar.”*

Resumo

A presente Dissertação se destina a compreender como se deu a implantação da plataforma carbonática Ponta do Mel, caracterizar seu modelo deposicional e sua evolução à luz da estratigrafia moderna, bem como entender as relações estratigráficas com as unidades sotopostas, sobrepostas e contemporâneas, a partir de dados de poços e sísmicos. A área foco deste estudo corresponde a uma faixa na porção offshore da Bacia Potiguar, que se dispõe paralelamente à linha de costa, a cerca de 40 km desta. As rochas carbonáticas da Formação Ponta do Mel datam do Neoalbiano e, semelhante ao que ocorre nas outras bacias da margem continental brasileira, sua deposição tem relação com os eventos de separação dos continentes Africano e Sul-americano. Na análise estratigráfica dos poços (análise 1D), foi possível caracterizar litofácies carbonáticas, as predominantes, além de litofácies mistas e siliciclásticas. Foi possível ainda individualizar ciclos de raseamento para o topo e conjuntos de ciclos, os quais foram associados aos tratos de sistemas identificados. Na análise sismoestratigráfica, da mesma forma, foram visualizadas quatro sismo fácies, as quais, de maneira geral, relacionam-se a processos trativos envolvidos na deposição das litofácies carbonáticas, mistas e siliciclásticas definidas na análise 1D. A integração dos resultados da análise dos dados de poços aos da análise sismoestratigráfica permitiu compreender que o intervalo estudado, o qual coincide, em termos litoestratigráficos, com a Formação Ponta do Mel, representa uma sequência deposicional completa, aqui referida como Sequência Albo-Cenomaniana, formada pelos tratos de sistemas de Nível Baixo (TSNB), Transgressivo (TST) e Nível Alto (TSNA). A história de sedimentação da unidade Ponta do Mel teve início a partir da deposição de litofácies siliciclásticas e carbonáticas em ambiente plataformar de água rasa, sucedido por um aumento do espaço de acomodação, em uma fase transgressiva, em que houve a deposição de um espesso intervalo de litofácies de águas mais profundas, representadas principalmente por calcilitos e pelitos, para que, então, ao final deste intervalo, fácies de granulação mais grossa, representadas principalmente por espessos pacotes de calcarenitos, e por vezes calcirruditos, passassem a dominar o cenário da plataforma, denotando uma fase regressiva e encerrando assim a Sequência Albo-Cenomaniana. Essas unidades e seus limites compõem um arcabouço estratigráfico de cunho genético, o qual contribui para o entendimento do modelo e da história deposicional que marcam a instalação e o desenvolvimento da plataforma carbonática Ponta do Mel durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar.

Palavras-chave: Estratigrafia de sequências carbonáticas; Formação Ponta do Mel; Albo-Cenomaniano; Bacia Potiguar

Abstract

This Dissertation intends to understand how the Ponta do Mel carbonate platform was implanted, to characterize its depositional model and its evolution in the light of modern stratigraphy, as well as to understand the stratigraphic relations with beneath, overlapping and contemporary units, from wells and seismic data. The focus area of this study corresponds to a belt in the offshore portion of the Potiguar Basin, which runs parallel to the shoreline, about 40 km from it. The carbonate rocks of the Ponta do Mel Formation date from the Late Albian and, similar to what occurs in the other basins of the Brazilian continental margin, their deposition is related to the separation events of the African and South American continents. In the stratigraphic analysis of the wells (1D analysis), it was possible to characterize carbonate lithofacies, that are the predominant, as well as mixed and siliciclastic lithofacies. It was also possible to individualize shallowing upward cycles and cycle sets, which were associated with the identified systems tracts. In the seismic stratigraphic analysis, in the same way, four seismic facies were visualized, which, in general, are related to the tectonic processes involved in the deposition of the carbonate, mixed and siliciclastic lithofacies, defined in the 1D analysis. The integration of the results from the well data analysis to the seismic stratigraphic analysis allowed to understand that the studied interval, which coincides, in lithostratigraphic terms, with the Ponta do Mel Formation, represents a complete depositional sequence, here referred to as the Albian-Cenomanian Sequence, formed by the Lowstand Systems Tract (LST), Transgressive Systems Tract (TST), and Highstand Systems Tract (HST). The sedimentation history of the Ponta do Mel unit started from the deposition of siliciclastic and carbonate lithofacies in a shallow water platform environment, followed by the increase of the accommodation space, in a transgressive phase, where there was the deposition of a thick interval of deeper water lithofacies, represented mainly by calcilutites and pelitic rocks, for that, thus, at the end of this interval, facies of coarser granulation, represented mainly by thick calcarenites layers, and sometimes calcirrudites, started to dominate the platform scenario, denoting a regressive phase and thus ending the Albian-Cenomanian Sequence. These units and their boundaries make up a stratigraphic genetic framework, which contributes to the understanding of the model and depositional history that mark the installation and development of the Ponta do Mel carbonate platform during the Late Cretaceous in the Potiguar Basin.

Keywords: Carbonate stratigraphic sequence; Ponta do Mel Formation; Albian-Cenomanian; Potiguar Basin

Lista de Figuras

Capítulo 1 – Introdução

Figura 1.1 – Mapa de localização da área de estudo, com a disposição dos poços e linhas sísmicas, base de dados da presente Dissertação de Mestrado. Destaque para os poços e seções sísmicas marcados em preto, os quais formam os dados escolhidos para ilustrar as interpretações desenvolvidas nesta pesquisa..... 15

Figura 1.2 – Fluxograma das etapas de trabalho, onde (1) corresponde à etapa de levantamento bibliográfico e de seleção dos dados adquiridos, (2) análise estratigráfica a partir dos poços, (3) análise estratigráfica com base nos dados sísmicos, (4) integração dos resultados e síntese estratigráfica e (5) artigo científico e defesa da dissertação 18

Capítulo 2 – Contexto Geológico Regional

Figura 2.1 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar, contendo as três supersequências (Rifte, pós-Rifte e Drifte), proposta por Pessoa Neto et al. (2007). Delimitada em destaque pelas linhas em vermelho está a Formação Ponta do Mel, objeto deste estudo..... 24

Capítulo 3 – Fundamentos da Análise Estratigráfica

Figura 3.1 – Síntese esquemática do princípio de geração da curva de raios gama, a partir de pulsos elétricos convertidos em fotomultiplicador (Ellis & Singer, 2008) 28

Figura 3.2 – Esquema ilustrativo apresentando um perfil de raios gama hipotético e a interpretação litológica correspondente (Modificado de Nichols, 2001)..... 29

Figura 3.3 – Padrões característicos dos perfis de raios gama (Emery & Myers, 1996)..... 30

Figura 3.4 – Padrões das terminações dos refletores contra os limites superior e inferior das sismossequências (Mitchum Jr. et al., 1977a; Severiano Ribeiro, 2001) 33

Figura 3.5 – Principais tipos de configurações internas das reflexões que caracterizam as sequências sísmicas (Mitchum Jr. et al., 1977b; Severiano Ribeiro, 2001) 34

Figura 3.6 – Principais tipos de configurações externas ou geometrias típicas de algumas sismofácies descritas nos dados sísmicos (Mitchum Jr. et al., 1977b; Severiano Ribeiro, 2001)..... 35

Capítulo 4 – Artigo Científico

Figure 4.1. Location map of the study area, with location of wells and seismic lines, which represent the database of this research. The wells and seismic data in black color were chosen to be presented..... 39

Figure 4.2. 1D Diagram of I-CES-9-CE reference well, showing the lithologic profile and the gamma curve, as well as the interpretations about the depositional systems, cycles sets, surfaces, systems tracts and depositional sequence. The location of this well can be consulted at the figure 4.1 45

Figure 4.3. 1D Diagram of I-CES-10-CE reference well, showing the lithologic profile and the gamma ray curve, as well as the interpretations about the depositional systems, cycle sets, surfaces, systems tracts and depositional sequence. The location of this well, and the legend of sequence stratigraphy surfaces and units can be consulted at the figure 4.1 46

Figure 4.4. Different types of cycles interpreted in the studied wells for Lowstand System Tract (LST), Transgressive System Tract (TST) and Highstand System Tract (HST). The arrows in the figure indicate the transition of these cycle types in each of three tracts, going from distal to more proximal areas in the depositional scenario 49

Figure 4.5. Interpreted seismic line A with location, seismic facies and its genetic units, chronostratigraphic surfaces and the reference well intercepted by the section. Faults are represented by black color lines in the figure. The interval termed seq in the figure corresponds to Albian-Cenomanian Sequence..... 52

Figure 4.6. Interpreted seismic line B with identified seismic facies and its sequence stratigraphy units, the reflectors terminations, chronostratigraphic surfaces and the reference well intercepted by the section. Faults are represented by black color lines in the figure. The interval termed seq in the figure corresponds to Albian-Cenomanian Sequence. The upper Campanian Unconformity also marks a canyon installation 53

Figure 4.7. Interpreted seismic line C A with location, seismic facies and its sequence stratigraphy units, chronostratigraphic surfaces and the reference well intercepted by the section. Faults are represented by black color lines in the figure. The layer termed seq in the figure corresponds to Albian-Cenomanian Sequence..... 54

Figure 4.8. Depositional scenario to the Albian-Cenomanian Sequence evolving throughout the systems tracts (Adapted from Handford and Loucks, 1993) 56

SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix

1-INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS.....	14
1.2 DADOS E MÉTODOS.....	16

2-CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	20
2.1 BACIA POTIGUAR	20
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO PONTA DO MEL.....	23

3-FUNDAMENTOS DA ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA

3. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA	27
3.1 PERFIS DE RAIOS GAMA.....	27
3.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS	31
3.3 SISMOESTRATIGRAFIA.....	32

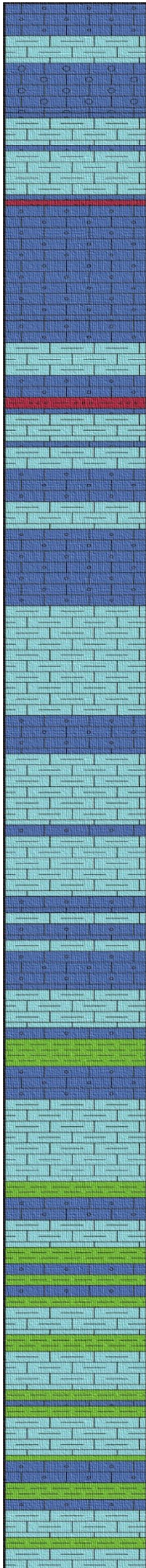
4-ARTIGO CIENTÍFICO

4. ARTIGO CIENTÍFICO.....	37
4.1 INTRODUCTION	38
4.2 MATERIAL AND METHODS.....	40
4.3 GEOLOGICAL SETTING.....	41

4.4 1D STRATIGRAPHIC ANALYSIS.....	43
4.4.1 Lithofacies.....	43
4.4.2 Sequence stratigraphy units and surfaces.....	47
4.4.3 Systems Tracts.....	47
4.5 2D STRATIGRAPHIC ANALYSIS.....	50
4.6 DISCUSSION	55
4.7 CONCLUSIONS	56
ACKNOWLEDGMENTS.....	57
REFERENCES.....	57

5-CONSIDERAÇÕES FINAIS

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
APÊNDICE A – DIAGRAMAS 1D.....	69



CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

Apresentação e Objetivos, Dados e Métodos

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

A Bacia Potiguar, situada no extremo Nordeste Brasileiro, possui um registro estratigráfico dividido em três supersequências: a Supersequência Rifte, que vai do Berriasiano a aproximadamente metade do Aptiano; a Supersequência Pós-Rifte, que equivale ao Andar Alagoas; e a Supersequência Drifte, que se estende do Albiano até o Recente (Pessoa Neto *et al.*, 2007). As sequências carbonáticas mais expressivas na Bacia Potiguar foram instaladas durante a fase/estágio Drifte. Neste momento, o regime tectônico controlador da bacia era o de subsidência termal e compensação isostática (Chang & Kowsmann, 1987, Chang *et al.*, 1992), típico do contexto de margem passiva. Inicialmente ocorreu a instalação de um sistema fluvial que passou gradativamente, em direção ao mar, para uma plataforma rasa siliciclástica a mista, com a implantação de sedimentação carbonática de borda de plataforma e um sistema de talude/bacia marcado pela formação de cânions submarinos com sedimentação turbidítica associada. Posteriormente, o sistema - formado pelas formações Açú, Ponta do Mel e Quebradas - foi gradativamente afogado pela grande transgressão do Neocretáceo (Pessoa Neto *et al.*, 2007). Duas sequências carbonáticas cretáceas foram identificadas por Tibana & Terra (1981) na Bacia Potiguar: a primeira, de idade albo-cenomaniana, definida como Formação Ponta do Mel, e a segunda compreendendo a Formação Jandaíra, de idade eoturoniana a eocampaniana.

O presente trabalho tem como objetivo geral buscar compreender a implantação da plataforma carbonática Ponta do Mel e, de maneira específica, definir suas unidades genéticas básicas e superfícies cronoestratigráficas chaves, à luz da Estratigrafia Moderna, entendendo as relações estratigráficas com as outras unidades e, como produto final, propor modelos estratigráficos evolutivos que retratem a sua evolução ao longo do intervalo Albo-Cenomaniano, na Bacia Potiguar. A área foco deste estudo corresponde à porção *offshore* da Bacia Potiguar que se dispõe paralela à linha de costa, a aproximadamente 40 km desta, e que diz respeito à porção espacial da bacia onde esta unidade tem sua ocorrência. A seguir segue a figura 1.1, a qual contém o mapa de localização da área de estudo e disposição dos poços e linhas sísmicas, base de dados deste trabalho. Os poços e seções sísmicas em destaque representam os dados que foram usados para apresentar as interpretações, uma vez que estão inseridos em um setor onde a resolução sísmica é melhor e intercepta poços de referência.

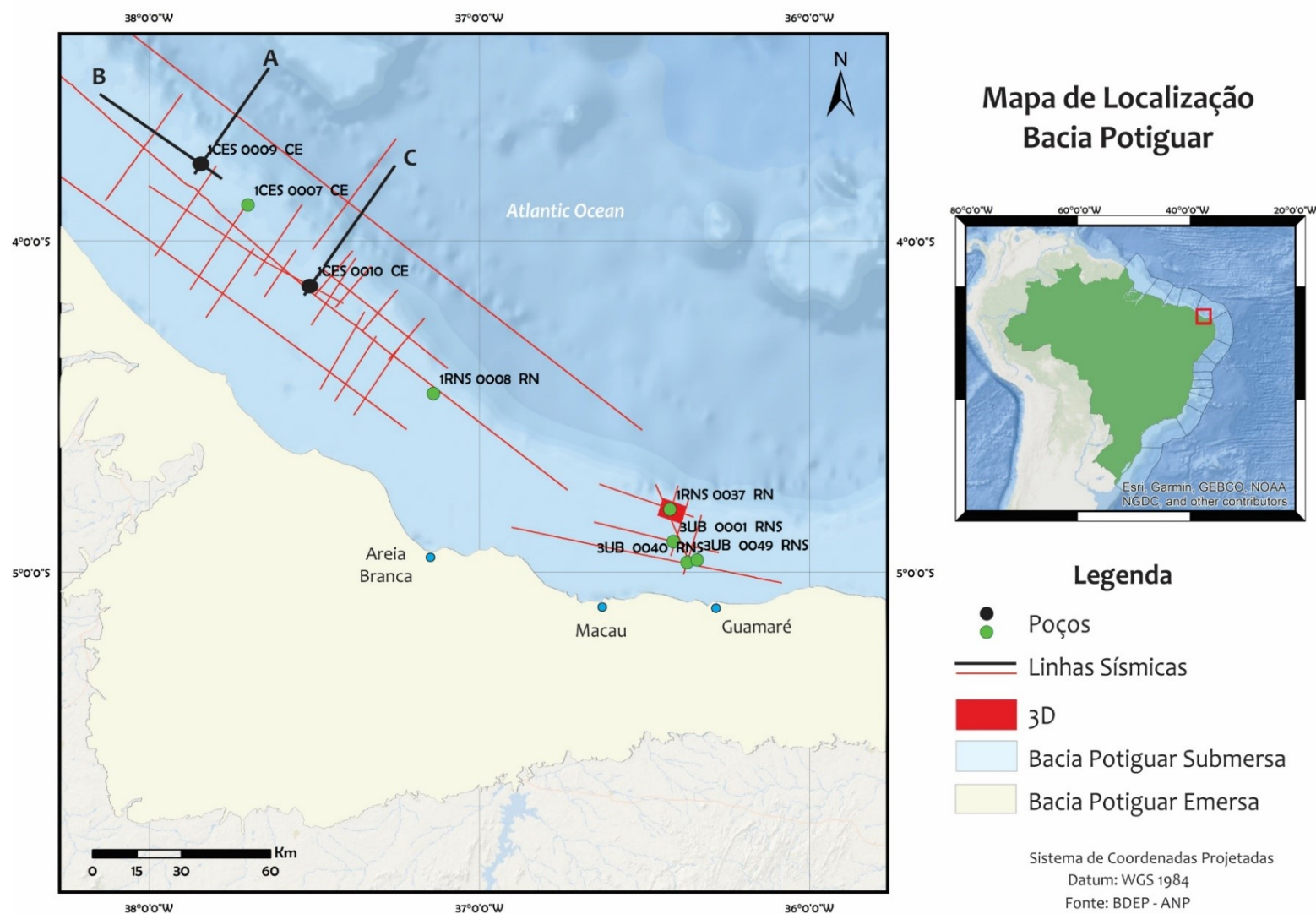


Figura 1.1 – Mapa de localização da área de estudo, com a disposição dos poços e linhas sísmicas, base de dados da presente Dissertação de Mestrado. Destaque para os poços e seções sísmicas marcados em preto, os quais formam os dados escolhidos para ilustrar as interpretações desenvolvidas nesta pesquisa.

1.2 DADOS E MÉTODOS

A presente pesquisa conta, como base de dados, informações provenientes de poços e da sísmica, adquiridas por meio de cota acadêmica do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da ANP. Compõem esses dados 8 poços da Bacia Potiguar submersa, 22 linhas sísmicas pós-empilhamento e 1 bloco sísmico 3D de aproximadamente 100 km². Desta base de dados foram escolhidos dois poços e três linhas sísmicas (figura 1.1) para terem suas interpretações apresentadas no capítulo 4 adiante.

Para a condução desta pesquisa, foram realizadas cinco etapas de trabalho assim organizadas (figura 1.2): (1) etapa de levantamento prévio acerca da bibliografia, e seleção dos dados, (2) etapa de análise estratigráfica 1D, (3) etapa de análise estratigráfica 2D, (4) etapa de integração dos dados e síntese estratigráfica, e (5) publicação do artigo científico e defesa da dissertação.

(1) Etapa de levantamento prévio acerca da bibliografia e da seleção dos dados

Esta etapa envolveu o levantamento bibliográfico, incluindo textos técnicos, que abordam a origem e evolução da Bacia Potiguar, a estratigrafia, o arcabouço estrutural, as fácies e os sistemas deposicionais da unidade carbonática Ponta do Mel, bem como referências sobre a fundamentação teórica acerca da perfilagem geofísica de poços, enfatizando os perfis de raios gama, e acerca dos conceitos e premissas da estratigrafia de sequências, método adotado nesta análise. Esta etapa foi ainda destinada à organização de uma base de dados, que envolveu a seleção e posterior solicitação da liberação dos mesmos ao BDEP (Banco de Dados de Exploração e Produção) – ANP, com vistas ao desenvolvimento do projeto de Mestrado, os quais possuem a PETROBRAS como órgão repositório. Esses dados abrangem os perfis compostos, arquivos gerais e pastas dos poços, bem como dados geoquímicos e arquivos .sgy do pacote sísmico.

(2) Etapa de análise estratigráfica 1D

Esta etapa se destinou à análise dos poços, a qual teve início com a vetorização dos mesmos e construção dos diagramas 1D. Nestes, foram descritas as litofácies, levando-se em consideração os perfis litológico e de raios gama, contidos nos perfis compostos, assim como

as descrições de amostras de calha e de testemunhos advindas das pastas dos poços. Foram ainda compiladas e reinterpretadas as informações da literatura acerca dos sistemas deposicionais, delimitados os ciclos de raseamento para o topo, os conjuntos de ciclos, os tratos de sistemas e a sequência deposicional, e posicionadas as superfícies-chave.

(3) Etapa de análise estratigráfica 2D

Esta etapa constou da interpretação sísmica 2D no *software Petrel* e da elaboração de seções sísmicas a partir das linhas aqui selecionadas para apresentação dos resultados. Cada seção constou da apresentação da localização da linha sísmica, das sismofácies identificadas, das terminações dos refletores, das superfícies cronoestratigráficas, assim como dos respectivos poços de correlação.

(4) Etapa de integração dos dados e síntese estratigráfica

A etapa envolveu a integração dos resultados obtidos em cada etapa anterior, o que permitiu o entendimento do modelo evolutivo idealizado para a Formação Ponta do Mel.

(5) Publicação do artigo científico e defesa da dissertação

Por fim, com todas essas etapas completadas, seus resultados e conclusões resultaram na finalização e defesa desta dissertação, assim como na elaboração do artigo científico, submetido em revista da área.

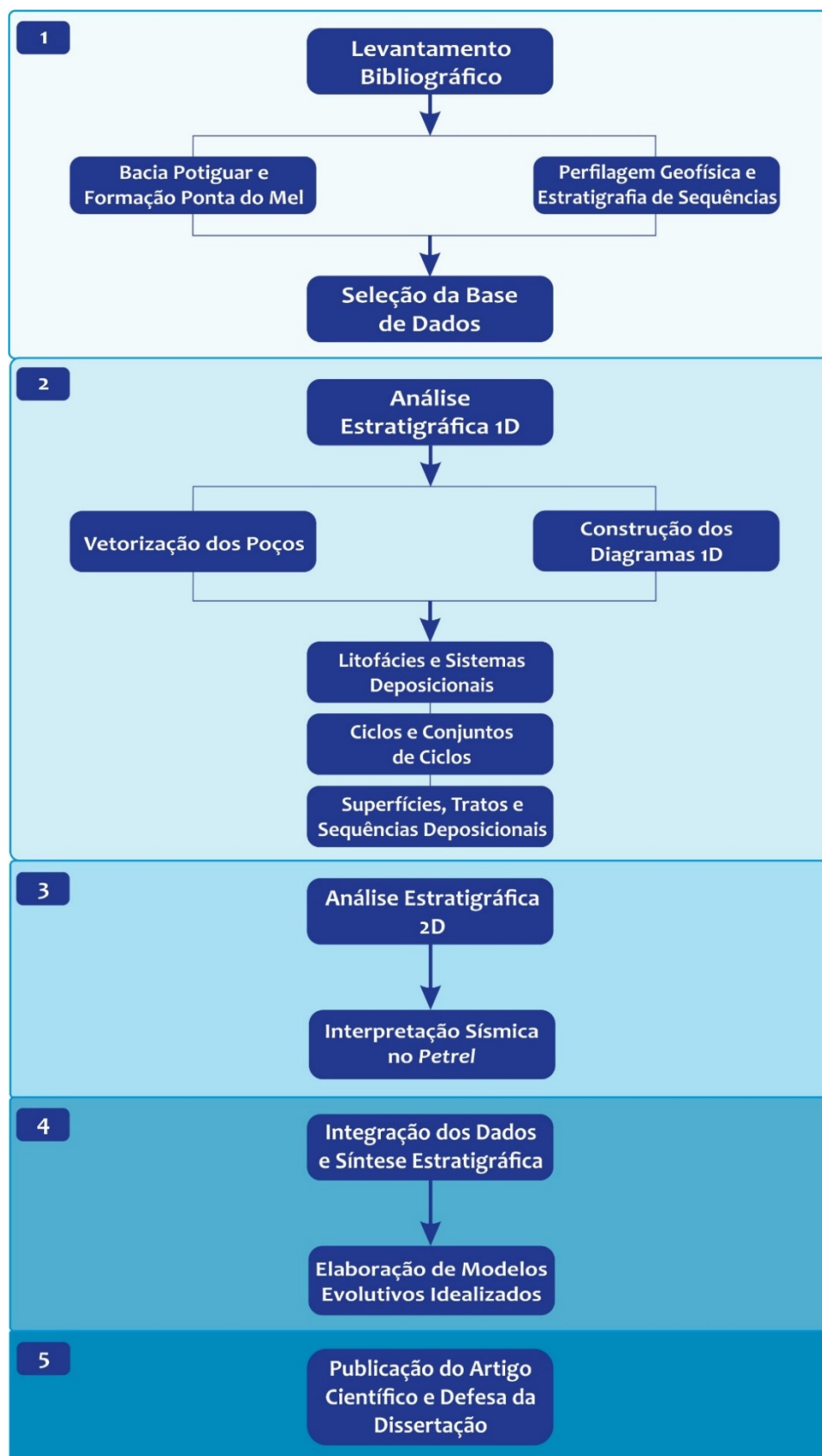
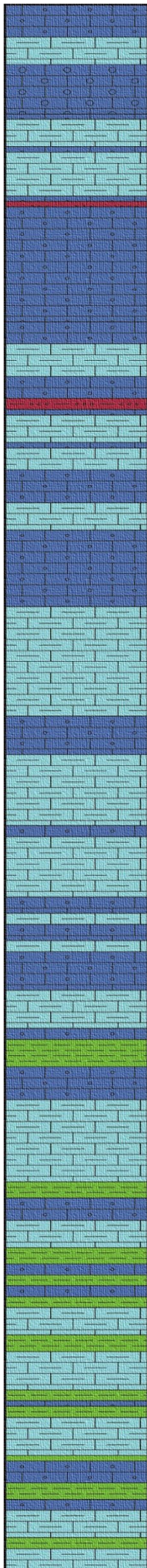


Figura 1.2 – Fluxograma das etapas de trabalho, onde (1) corresponde à etapa de levantamento bibliográfico e de seleção dos dados adquiridos, (2) análise estratigráfica a partir dos poços, (3) análise estratigráfica com base nos dados sísmicos, (4) integração dos resultados e síntese estratigráfica e (5) artigo científico e defesa da dissertação.



CAPÍTULO 2- CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Bacia Potiguar, Caracterização da Formação Ponta do Mel

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 BACIA POTIGUAR

A Bacia Potiguar compreende dois segmentos, um emerso e outro submerso, abrangendo em sua maior parte o Estado do Rio Grande do Norte e, parcialmente, o Estado do Ceará. Seus limites são a sul, leste e oeste com o embasamento cristalino, estendendo-se para norte até a isóbata de 2.000 m. O Alto de Fortaleza define seu limite oeste com a Bacia do Ceará, e o Alto de Touros, seu limite leste. A área aproximada da bacia é de 48.000 km², dos quais 45% encontram-se emersos e 55% submersos (Pessoa Neto *et al.*, 2007). O registro estratigráfico inclui três supersequências, estando o seu preenchimento sedimentar intimamente relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica.

A Bacia Potiguar teve sua origem diretamente ligada à evolução dos segmentos leste e equatorial brasileiros, a partir da separação das placas Sul-Americana e Africana, durante a quebra do Gondwana, culminando na abertura do Atlântico Sul. Este evento corresponde ao mesmo que caracterizou a instalação das bacias do Recôncavo, Tucano, Jatobá, Rio do Peixe, Araripe e Sergipe-Alagoas. Estas bacias, juntamente com a Bacia Potiguar, compõem o Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro (Matos, 1987).

A história tectônica da Bacia Potiguar teve início no Neocomiano e pode ser dividida em três fases distintas – a fase Rifte, a pós-Rifte e a Drifte, as quais também estão relacionadas ao registro estratigráfico da bacia, dividido em três supersequências homônimas. De acordo com Pessoa Neto *et al.* (2007) são elas: a Supersequência Rifte (Neoberriasiano-Eoaptiano), a Supersequência pós-Rifte (Mesoaptiano-Eoalbiano) e a Supersequência Drifte (Mesoalbiano-Recente). A Supersequência Rifte corresponde ao preenchimento da bacia durante as fases Rifte I e Rifte II, sendo marcada por uma deposição em ambiente estritamente continental. A fase Rifte I (Neoberriasiano-Eobarremiano) é caracterizada por um regime tectônico de estiramento crustal, com altas taxas de subsidência mecânica do embasamento. As sequências mais basais compreendem uma sedimentação lacustre com fluxos gravitacionais de arenitos e conglomerados, alimentados por sistemas deltaicos e de leques aluviais/deltaicos, provenientes das duas margens da bacia. Já nas sequências mais superiores a sedimentação é predominantemente flúvio-deltaica progradante, com contribuição de sistemas deposicionais axiais (SW-NE) e provenientes da margem flexural (NW-SE) da calha tectônica. A fase Rifte II (Neobarremiano-Eoaptiano) é caracterizada pela

implantação do regime transcorrente/transformante ao longo da futura margem equatorial, causando uma mudança na cinemática do rifte e provocando um deslocamento do eixo de rifteamento para a porção submersa da bacia, ao mesmo tempo em que causa soerguimento e erosão na porção emersa. A direção de transporte tectônico muda de NNW para E-W, com movimentos predominantemente transtensionais dextrais. O seu registro está restrito à porção submersa da bacia e compreende a porção mais superior da Formação Pendência, sendo constituída por arenitos grossos e pelitos de um sistema fluvio-deltaico-lacustrino. A última sequência que compõe a fase Rifte da Bacia Potiguar, portanto o topo da Supersequência Rifte, é representada pela Formação Pescada, reconhecida inicialmente no bloco baixo da Falha de Pescada e sendo constituída por uma cunha clástica sintectônica, dominando os sistemas deposicionais de leques aluviais e sistemas fluviais de alta energia, com alguns bancos carbonáticos restritos (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

A partir do Mesoaptiano inicia-se a deposição da Supersequência pós-Rifte. Esta supersequência é caracterizada por um regime tectônico de relativa quietude, devido ao início do processo de resfriamento da litosfera previamente distendida e aquecida na fase rifte (Vasconcelos, 1995), onde gradativamente ocorre a passagem de sistemas deposicionais continentais para marinhos. A sedimentação do pós-Rifte é dominada por sistemas deposicionais flúvio-lacustres, cuja deposição dos sedimentos se deu sobre uma forte discordância angular no topo da seção rifte, e o registro litológico é representado pelas rochas da Formação Alagamar (Pessoa Neto *et al.*, 2007). A seção superior desta unidade representa a primeira ingressão marinha na Bacia, registrada nos calcilitos algálicos e ostracoidais das Camadas Ponta do Tubarão (Vasconcelos, 1995).

A partir do Mesoalbiano tem-se início a sedimentação da sequência marinha propriamente dita. Neste momento, o regime tectônico controlador é o de subsidência termal e compensação isostática (Chang & Kowsmann, 1987, Chang *et al.*, 1992), típico do contexto de margem passiva, e o ambiente deposicional é inicialmente marinho raso, com a formação incipiente de sistema de plataforma-talude e bacia, dando início à Supersequência Drifte na Bacia Potiguar. O preenchimento sedimentar durante este estágio pode ser dividido em dois conjuntos de sequências: as Sequências Marinhas Transgressivas, de idade Mesoalbiano-Eocampaniano, e as Sequências Marinhas Regressivas, de idade Neocampaniano-Recente. Nesta fase, a bacia experimenta taxas mais modestas de subsidência, com o depocentro principal formando uma grande calha fluvial de orientação geral NE-SW. Esse sistema fluvial passa gradativamente em direção ao mar para uma plataforma rasa siliciclástica a mista, com

a implantação de sedimentação carbonática de borda de plataforma e um sistema de talude/bacia marcado pela formação de cânions submarinos com sedimentação turbidítica associada. Posteriormente, o sistema - formado pelas formações Açu, Ponta do Mel e Quebradas - é gradativamente afogado pela grande transgressão do Neocretáceo, resultando em empilhamento vertical de sistemas fluviais, com sistemas entrelaçados na base, passando a meandantes grossos, meandantes finos e estuarinos no topo. O afogamento máximo dos sistemas fluviais ocorre no Eoturoniano, dando lugar à implantação de extensa plataforma/rampa carbonática dominada por maré, formada na transição para as sequências regressivas e representada pela Formação Jandaíra, cujas rochas mais novas apresentam idade eocampaniana (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

A partir de um evento erosivo de grande magnitude ocorrido durante o Neocampaniano, tem início um grande ciclo de sequências regressivas que se estende até o Holoceno. As sequências regressivas representam o registro estratigráfico na bacia entre o Neocampaniano e os dias atuais. Caracterizam-se por sistemas mistos compostos por leques costeiros, sistemas de plataformas rasas com borda carbonática e sistemas de talude/bacia. Os correspondentes litoestratigráficos dessas sequências são as rochas das formações Barreiras, Tibau, Guamaré e Ubarana (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

Três eventos magmáticos principais são identificados na Bacia Potiguar: Rio Ceará Mirim, Cuó e Macau. O evento magmático conhecido como Formação Rio Ceará Mirim ocorre na forma de diques de diabásio com forte orientação E-W no embasamento adjacente à borda sul da Bacia Potiguar, com pulso em $132,2 \pm 1$ Ma. O evento magmático conhecido como Formação Serra do Cuó ocorre na forma de derrames de basalto com tendência alcalina, apresentando idades radiométricas (Ar-Ar) com idade de $93,1 \pm 0,8$ Ma (Souza *et al.*, 2004). E, mais recente, o evento magmático conhecido como Formação Macau ocorre intercalado aos sedimentos da sequência regressiva e no embasamento adjacente à bacia, sendo datados pulsos no Eoceno/Oligoceno com idades distribuídas entre 70-65 e 9-6 Ma, com picos entre $48,9 \pm 2,9$ e $31,4 \pm 1,5$ Ma. Um pulso mais novo no Mioceno com idade mínima de $14,7 \pm 0,9$ Ma é datado com base em relações estratigráficas em poços na porção submersa da bacia (Pessoa Neto, 1999). Silveira (2006) em sua tese mapeia os principais centros magmáticos da porção central do Estado do Rio Grande do Norte, identificando dois estágios de magmatismo: Magmatismo Cretácico e o Magmatismo Terciário. O primeiro sendo correlacionado ao magmatismo Rio Ceará-Mirim e o segundo compreendendo rochas basálticas correlacionáveis ao magmatismo Macau.

A seguir encontra-se ilustrada a figura 2.1, que traz a atual Carta Estratigráfica da Bacia Potiguar publicada por Pessoa Neto *et al.* (2007).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO PONTA DO MEL

De acordo com Pessoa Neto *et al.* (2007), as rochas carbonáticas da Formação Ponta do Mel foram depositadas no final do Albiano, aproximadamente entre 105 e 99 Ma. Campos (2012) explica que durante o Campaniano a Bacia Potiguar foi exposta e parte da deposição carbonática da unidade Ponta do Mel esteve submetida à erosão. Eventos tectônicos também afetaram suas rochas, desde o final do Cretáceo até o Recente. Devido à alta alteração química das rochas carbonáticas, a diagênese e os processos tectônicos modificaram a estrutura original de deposição.

Tibana & Terra (1981) defendem que a deposição desta sequência carbonática, semelhante ao que ocorre nas outras bacias da margem continental brasileira, tem relação com os eventos da separação continental. Segundo os mesmos autores, os primeiros depósitos carbonáticos são de água rasa e consistem em calcarenitos a moluscos e oncolitos, dolomitizados, os quais ocorrem intercalados a siliciclásticos da Formação Açu, ao fim de um ciclo regressivo. Em seguida, inicia-se um período de grande subsidência, predominando a deposição de terrígenos argilosos, os quais foram gradativamente substituídos por calcários com considerável conteúdo de foraminíferos planctônicos, representando a fase transgressiva da sequência. À medida que as fácies de plataforma rasa foram progradando sobre os sedimentos mais distais, iniciou-se a fase regressiva da sequência. No início houveram condições de desenvolvimento de bancos de algas posicionados na margem da plataforma, o que propiciou a instalação de uma laguna na sua retaguarda, favorecendo processos diagenéticos como a dolomitização, comumente descrita na Formação Ponta do Mel. Num estágio subsequente, a plataforma rasa alcança um gradiente mais homogêneo, onde se formam depósitos de alta energia, com bioclastos algálicos e/ou oncolitos, dependendo das condições de ambientais. Na parte superior deste ciclo identifica-se a predominância de microfácies ricas em oncolitos com a presença do gênero *Trocholina* (Tibana & Terra, 1981). A faixa de ocorrência desta unidade é bem limitada. A sul e sudoeste, as fácies carbonáticas gradam para fácies siliciclásticas (Tibana & Terra, 1981). Para norte, a Formação Ponta do Mel tende diminuir de ocorrência a curtas distâncias até desaparecer. É nesta direção que são normalmente encontradas rochas de idade Neocretáceo em contato direto com aquelas rochas

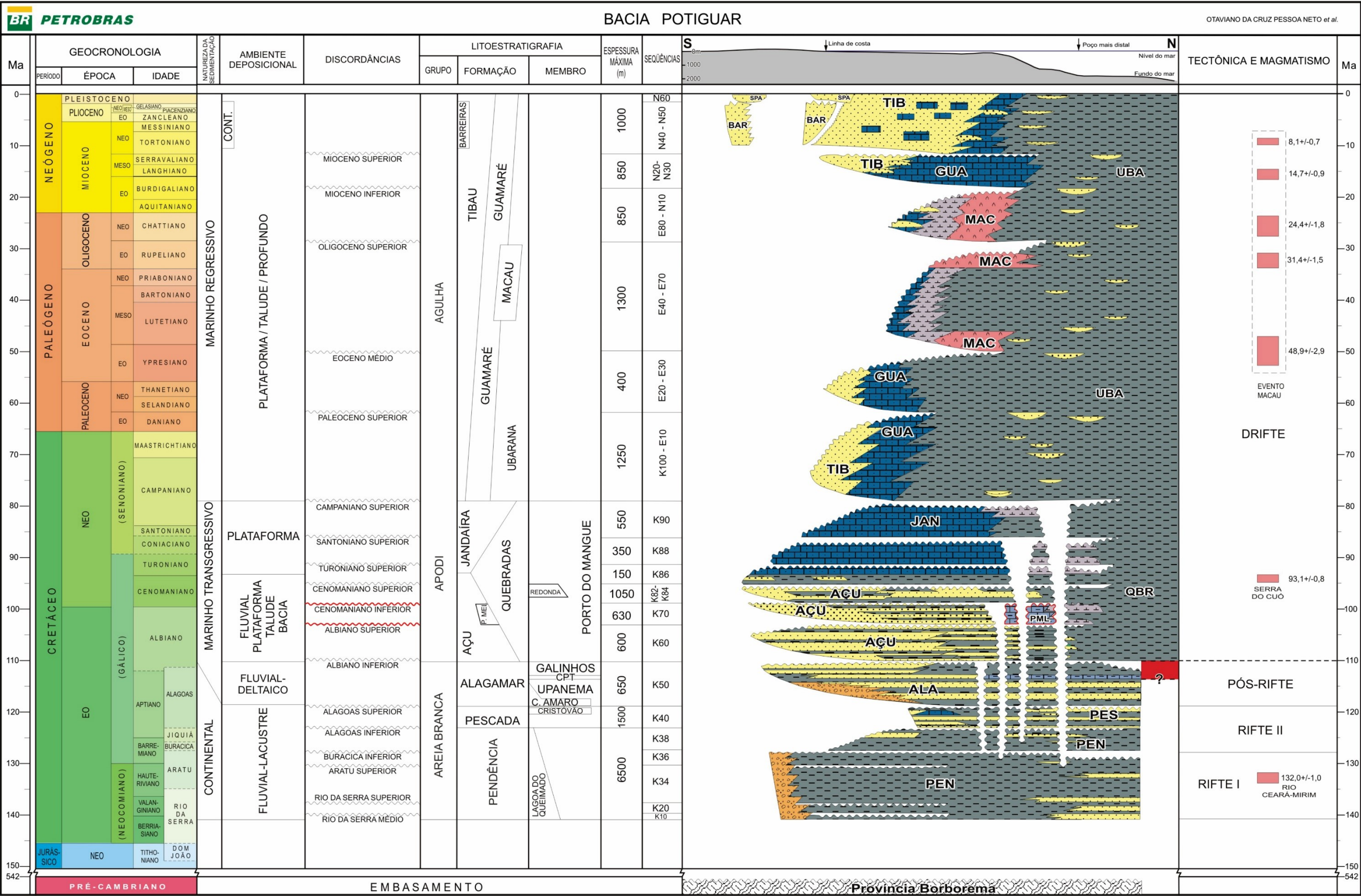


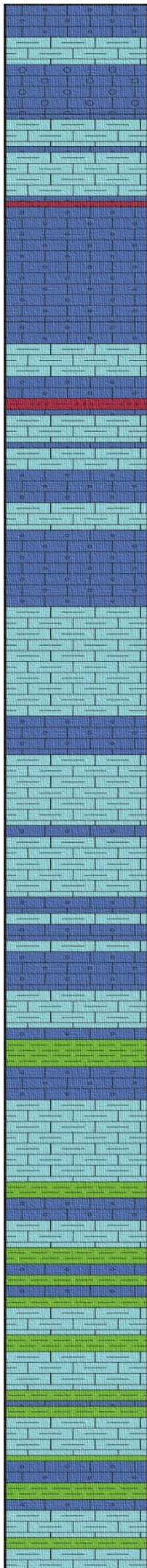
Figura 2.1—Carta estratigráfica da Bacia Potiguar, contendo as três superseqüências (Rifte, pós-Rifte e Drifte), proposta por Pessoa Neto et al. (2007). Delimitada em destaque pelas linhas em vermelho está a Formação Ponta do Mel, objeto deste estudo.

do Andar Alagoas.

Para Terra (1990), a história de sedimentação da unidade teve início a partir da deposição de sedimentos de águas rasas, os quais foram depositados em toda a plataforma. Com o aumento da subsidência, depositou-se uma grande espessura de sedimentos de águas profundas ao norte do sistema de falhas de Ubarana, diferentemente da porção sul, onde os sedimentos de águas rasas foram pouco expressivos e, posteriormente, erodidos sem deixar registro geológico. Em um segundo momento, com a subida do nível do mar, a sedimentação foi retomada, havendo progradação da plataforma carbonática e o desenvolvimento de uma espessa seção de carbonatos.

De acordo com Dias-Brito (1985), a porção mais basal da seção superior da Formação Ponta do Mel representa ambientes de águas profundas e de baixa energia dominados por lama carbonática: fácies de *mudstones* e *wackestones* com foraminíferos planctônicos e pitonélideos. Já, a porção superior da unidade, mostra principalmente um ambiente de águas rasas de alta energia dominado por grãos: fácies de *grainstones* e *packstones* ooidais-oncoidais comumente com algas vermelhas e alguns foraminíferos bentônicos. Granier *et al.* (2008) sugere que o limite entre estas subunidades da Formação Ponta do Mel pode registrar um rápido rebaixamento do nível do mar, que é uma regressão forçada, sendo, portanto, interpretado como um importante limite de sequência.

Em trabalho mais recente, Cazarin *et al.* (2014) definiram a Formação Ponta do Mel como uma plataforma carbonática com borda bioconstruída, na qual foram identificadas sete superfícies estratigráficas, sendo duas litoestratigráficas, quatro discordâncias com feições cársticas e uma superfície transgressiva. Ao todo, foram também reconhecidas onze litofácies com base nos dados de cinco testemunhos e estas, por sua vez, foram agrupadas em quatro associações de fácies e correlacionadas com três sismofácies: (i) fácies bioconstruídas e recifes, associadas a sismofácies do tipo caótica; (ii) *grainstones*, que constituem barras, associados a sismofácies dos tipos sigmoidal e lenticular; (iii) *wackestones* e *mudstones* de laguna e (iv) *mudstones* a *birdseyes* de planície de maré, as duas últimas associações relacionadas a sismofácies paralela/subparalela.



CAPÍTULO 3- FUNDAMENTOS DA ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA

Perfis de Raios Gama, Estratigrafia de Sequências, Sismoestratigrafia

3. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma fundamentação teórica prévia a ser aplicada no capítulo 4 a seguir, onde serão desenvolvidos os resultados a partir dos dados interpretados para esta dissertação.

No primeiro item, 3.1, serão apresentados os conceitos teóricos acerca da perfilagem de raios gama e sua aplicação na análise estratigráfica de poços. O segundo item, 3.2, será destinado às considerações sobre a estratigrafia de sequências clássica e, por fim, o item 3.3 apresentará os principais conceitos acerca da análise sismoestratigráfica, base metodológica desta pesquisa.

3.1 PERFIS DE RAIOS GAMA

Segundo Telford *et al.* (1990), a radioatividade natural das rochas tem origem a partir do decaimento da série de isótopos instáveis dos elementos urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K). Esse decaimento de forma espontânea gera três tipos de partículas radioativas: alfa (α), beta (β) e gama (γ).

Especificamente, a radiação gama é definida como uma onda eletromagnética ou uma partícula de energia, isto é, fótons, sendo, portanto, representada como um pulso elétrico. A radiação gama possui frequência entre 1.019 e 1.021 Hz, o que equivale a comprimentos de onda entre 10^{-9} e 10^{-11} cm (Luthi, 2001).

A radioatividade natural medida em levantamentos geofísicos fundamentalmente é constituída por essa radiação gama causada pelo decaimento de isótopos pai (instáveis) para elementos filhos (mais estáveis). A taxa de elementos filhos é proporcional à quantidade de isótopos pai (Ribeiro, 2016). O decaimento de isótopos instáveis é caracterizado pelo tempo de meia-vida, que é o tempo necessário para que um elemento químico sujeito a decaimento radioativo perca metade da sua massa. Nas rochas, apenas isótopos com meia vida da ordem de bilhões de anos contribuem para a radioatividade natural, pois isótopos com meia vida curta já foram transformados em elementos filhos estáveis em um passado geológico distante (Wollenberg, 1977).

Ribeiro (2016) ressalta que os isótopos mais relevantes para estudos de radioatividade em rochas e solos são o urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K). O urânio é encontrado em rochas ígneas ácidas e sedimentos ricos em matéria orgânica, como por exemplo os

folhelhos marinhos, assim como são também encontrados em minerais de argila e silte. Já, o tório é encontrado em rochas ígneas intrusivas como, por exemplo, granitos, granodioritos e sienitos (Ribeiro, 2016).

A ocorrência de potássio está relacionada a minerais de argila (ilita e glauconita), mica (muscovita e biotita) e feldspatos (ortoclásio), sendo também encontrados em sucessões de evaporitos (silvinitas e sulfatos). O isótopo radioativo do potássio é o ^{40}K que, por emissão de partículas gama, decai para ^{40}Ar . O ^{40}K possui meia-vida de 1,3 bilhões de anos e é um elemento relativamente raro na crosta terrestre, pois menos de 1% de todo o potássio da crosta é encontrado nessa forma (Ribeiro, 2016).

De acordo com Ribeiro (2016), o perfil de radiação gama natural (RG) foi introduzido em 1939 como sendo o primeiro perfil geofísico não elétrico. A detecção da radiação gama nos perfis RG é realizada através de um sensor composto por um cintilômetro. De um modo geral, o cintilômetro é composto por um cristal de iodeto de sódio (NaI) ativado por tálio. O cristal que compõe esse sensor, quando exposto aos raios gama (γ), emite fótons que são amplificados e convertidos em pulsos elétricos através de um tubo fotomultiplicador opticamente acoplado (Ribeiro, 2016). Este pulso é então registrado e transformado em uma curva (figura 3.1).

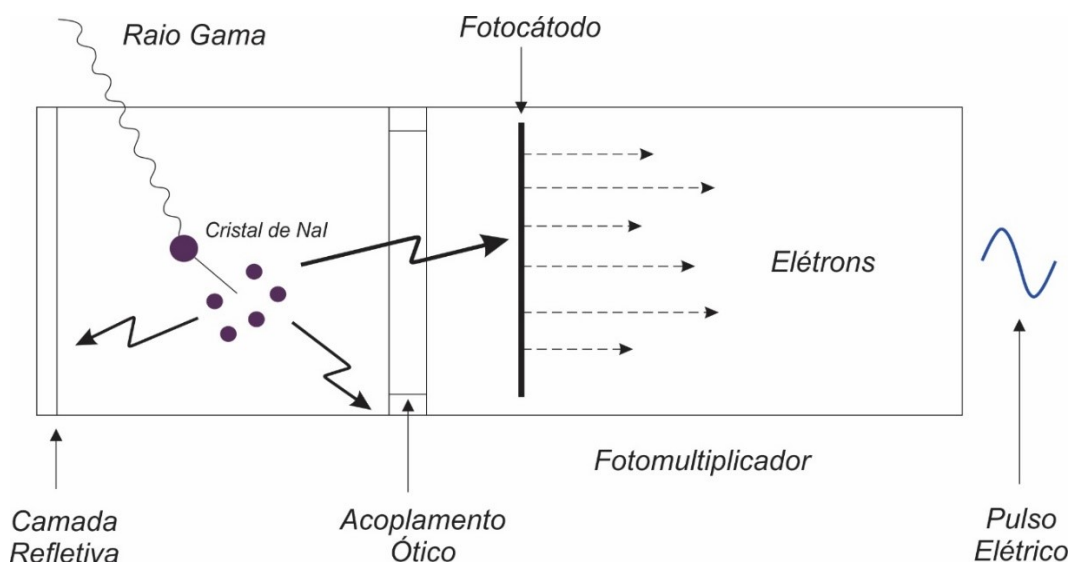


Figura 3.1 – Síntese esquemática do princípio de geração da curva de raios gama, a partir de pulsos elétricos convertidos em fotomultiplicador (Ellis & Singer, 2008).

Ainda segundo Ribeiro (2016), em sedimentos e rochas sedimentares, o perfil expressa o conteúdo de argilominerais das formações. Isso ocorre devido ao fato destes minerais acumularem frações relevantes de isótopos radioativos. Essas características fazem com que o perfil de raios gama seja considerado um perfil litológico, pois traz informações do conteúdo

mineral diferenciando sedimentos argilosos de arenosos.

Dessa forma, Luthi (2001) sintetiza que as rochas que possuem a maior concentração de minerais radioativos são: folhelhos, arcósios e grauvacas, arenitos argilosos, rochas ricas em matéria orgânica, rochas ígneas ácidas, além de rochas ricas em fosfatos e em sais de potássio. Abaixo está ilustrada a figura 3.2, sintetizando a resposta de diferentes litologias ao perfil de raios gama.

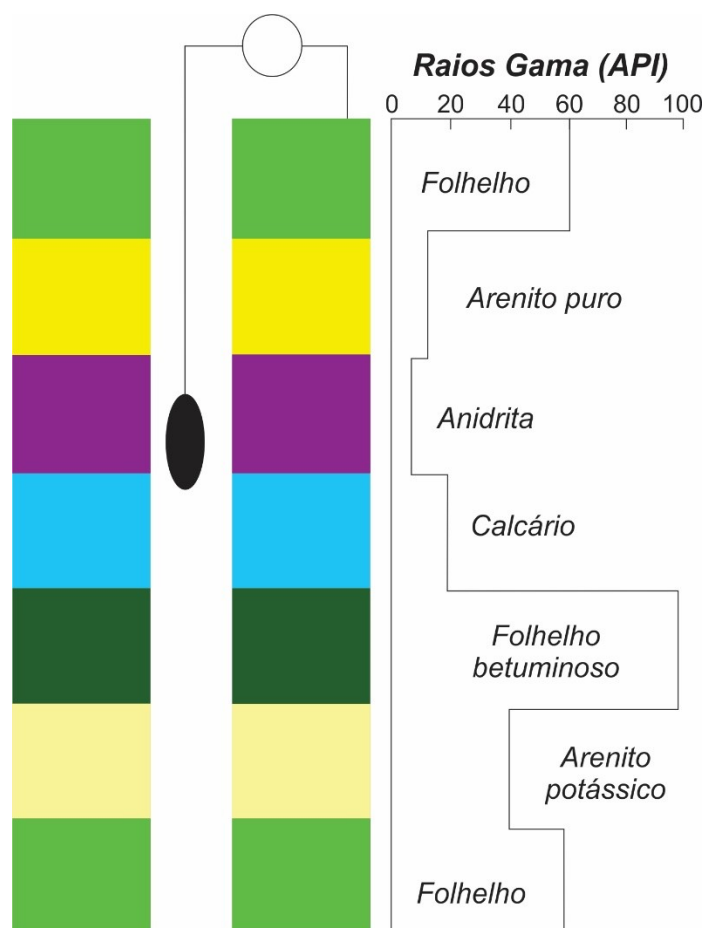


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo apresentando um perfil de raios gama hipotético e a interpretação litológica correspondente (Modificado de Nichols, 2001).

Deixando a escala centimétrica a métrica de estrato e passando para a escala de sucessões de estratos, Emery & Myers (1996) associaram diferentes padrões nos perfis de raios gama a tendências de aumento ou diminuição da granulometria. Segundo estes autores, estas tendências correspondem ao aumento ou diminuição na quantidade de fácies areníticas e fácies pelíticas dentro de determinada sucessão; atentando-se, obviamente, para o fato que arenitos arcosianos, ricos em feldspato potássico, produzirão valores mais elevados de raios gama que os arenitos quartzosos. A figura 3.3 ilustra os padrões nos perfis de raios gama reconhecidos por esses autores.

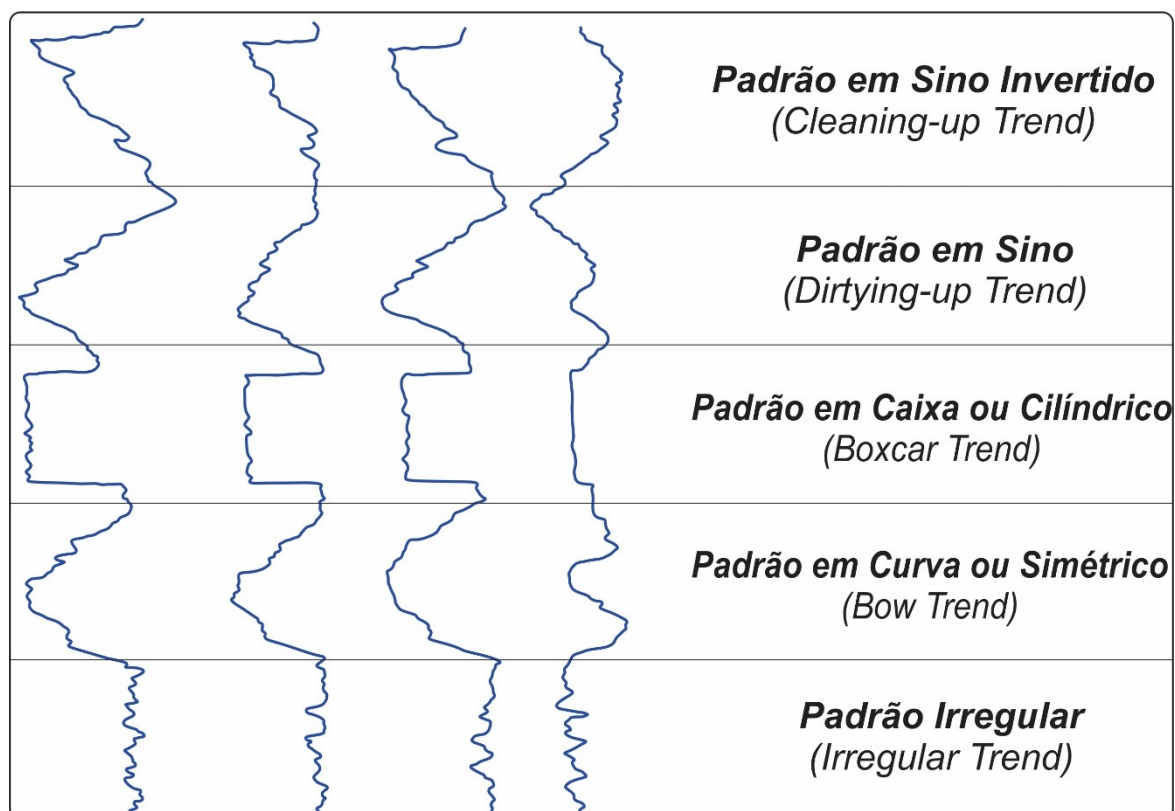


Figura 3.3 – Padrões característicos dos perfis de raios gama (Emery & Myers, 1996).

De acordo com Emery & Myers (1996), o padrão em sino invertido representa uma diminuição progressiva nos valores de raios gama em direção ao topo. Isto reflete uma diminuição ascendente na quantidade de argilominerais, indicando assim uma mudança progressiva na litologia, de forma que as fácies mais finas predominarão na base do intervalo do perfil e as fácies mais grossas no topo (Emery & Myers, 1996).

O padrão em sino mostra o contrário do padrão anterior. Isto porque os valores de raios gama aumentam em direção ao topo do intervalo e, dessa forma, está relacionado a um predomínio de fácies mais argilosas ou finas para o topo, o que pode ser interpretado como uma diminuição da energia deposicional, típico, por exemplo, de sucessões fluviais (Emery & Myers, 1996).

O padrão em caixa ou cilíndrico revela valores de raios gama com pouquíssima variação, seguindo um padrão mais constante, e cujos limites superior e inferior são abruptos com as litofácies sobre e subjacentes. Emery & Myers (1996) interpretam esse padrão como sendo típico de arenitos fluviais, turbidíticos ou eólicos.

O padrão em curva ou simétrico pode ser entendido como uma tendência superior em sino passando a sino invertido para a base, seguindo uma passagem gradual, sem mudança

abrupta de um para o outro. Para Emery & Myers (1996) o padrão em curva é geralmente resultado de um aumento seguido de uma diminuição na taxa de sedimentação clástica no ambiente deposicional.

O último padrão descrito por esses autores, o padrão irregular, é descrito como um padrão onde não se pode notar mudanças significativas no perfil de raios gama, possivelmente representando agitação de argilitos e siltitos e podendo ser típico de ambiente plataformar ou ambiente de águas profundas (Emery & Myers, 1996).

3.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

A estratigrafia de sequências é o estudo de unidades de estratos sedimentares geneticamente relacionados, dentro de um arcabouço de superfícies cronoestratigráficas significativas (Della Fávera, 2001). A sua unidade fundamental é a sequência deposicional, que é definida como sendo uma sucessão relativamente concordante de estratos geneticamente relacionados limitados por discordâncias ou suas concordâncias correlativas (Mitchum, 1977). As sequências deposicionais, por sua vez, podem ser subdivididas em unidades menores da estratigrafia, as quais detêm padrões de empilhamento distintos (Allen & Allen, 2013). Essas unidades foram denominadas tratos de sistemas por Van Wagoner *et al.* (1988). Esses tratos de sistemas, por sua vez, podem ser compartimentados em unidades menores, que são os ciclos e conjunto de ciclos, conforme adotado neste trabalho.

Esses ciclos são caracterizados de acordo com as tendências de variação textural, que podem ser de afinamento ou de engrossamento textural para o topo, referindo-se, segundo Kerans & Tinker (1997), ao menor conjunto de litofácies geneticamente relacionadas depositadas em um único ciclo do nível de base. Os limites de ciclos estão associados à passagem da queda do nível de base para a subida do nível de base (Kerans & Tinker, 1997), que marcam superfícies de inundação. O agrupamento desses ciclos em um conjunto é baseado na configuração ou padrão do seu empilhamento, que pode ser classificado em: (i) prográdacional, (ii) retrogradacional e (iii) agradacional.

Holz (2012) explica que o Trato de Sistemas de Nível Baixo (TSNB) é formado no estágio precoce da subida do nível de base, o que tende a criar lentamente um espaço de acomodação em uma fase de regressão normal, marcada por um padrão prográdacional das fácies. À medida que o nível de base começa, de fato, a subir, desenvolve-se uma superfície, denominada de Superfície Transgressiva (*sensu* Van Wagoner *et al.*, 1988), que marca a

mudança no padrão de empilhamento de progradacional para retrogradacional. Instala-se então o Trato de Sistemas Transgressivo (TST), em um período agora de transgressão, onde a taxa de criação do espaço de acomodação passa a ser superior à taxa de aporte sedimentar, notadamente revelado por um padrão retrogradacional das fácies. Ao final desse trato, desenvolve-se uma superfície, nomeada de Superfície de Inundação Máxima (*sensu* Van Wagoner *et al.*, 1988), a qual caracteriza a máxima expansão da bacia em direção ao continente. Por fim, o Trato de Sistemas de Nível Alto (TSNA) representa a fase final de subida do nível de base, marcando um estágio de regressão normal, onde a taxa de criação do espaço de acomodação vai caindo comparativamente à taxa de aporte sedimentar, se reestabelecendo assim o padrão de empilhamento progradacional para as fácies, momento em que o aporte sedimentar é maior que o espaço de acomodação criado.

3.3 SISMOESTRATIGRAFIA

A análise sismoestratigráfica, aliada ao estudo estratigráfico de poços, representa um método fundamental e extremamente importante na aplicação da estratigrafia de sequências em análise de bacias e de sucessões sedimentares.

A análise sismoestratigráfica ou, simplesmente, sismoestratigrafia tem como unidade básica a sequência sísmica ou sismossequência (Severiano Ribeiro, 2001). Esse autor explica que essa unidade básica é composta por uma sucessão de refletores concordantes interpretados como estratos geneticamente relacionados e limitados por refletores conspícuos e/ou regionais que marcam discordâncias ou suas concordâncias correlativas. Para Vail *et al.* (1977), Emery & Myers (1996) e Severiano Ribeiro (2001), os refletores sísmicos evidenciam contrastes de impedância acústica entre dois pacotes rochosos contíguos. A importância em reconhecê-los, portanto, reside no fato de que a impedância acústica coloca em evidência superfícies crono significativas que representam linhas de tempo essencialmente síncronas em quase toda a sua extensão, separando estratos antigos de estratos mais jovens (Vail *et al.*, 1977; Emery & Myers, 1996; Severiano Ribeiro, 2001). Para este último autor, identificar e mapear as superfícies estratais, sobretudo as discordâncias, contribui na elaboração do arcabouço estratigráfico de uma bacia sedimentar.

Della Fávera (2001) mostra que o objetivo principal da análise sismoestratigráfica consiste na definição das sismossequências e seus respectivos tratos de sistemas através da identificação de discontinuidades por meio das terminações dos refletores. Essas terminações

são comumente caracterizadas em uma seção sísmica 2D pelas relações geométricas entre as reflexões e as superfícies sísmicas contra as quais elas terminam (Emery & Myers, 1986), podendo ser localizadas sotopostas ao seu limite (truncamento erosional, *toplap* ou concordante) ou sobrepostas (*onlap*, *downlap* ou concordante; Mitchum Jr *et al.*, 1977a; figura 3.4).

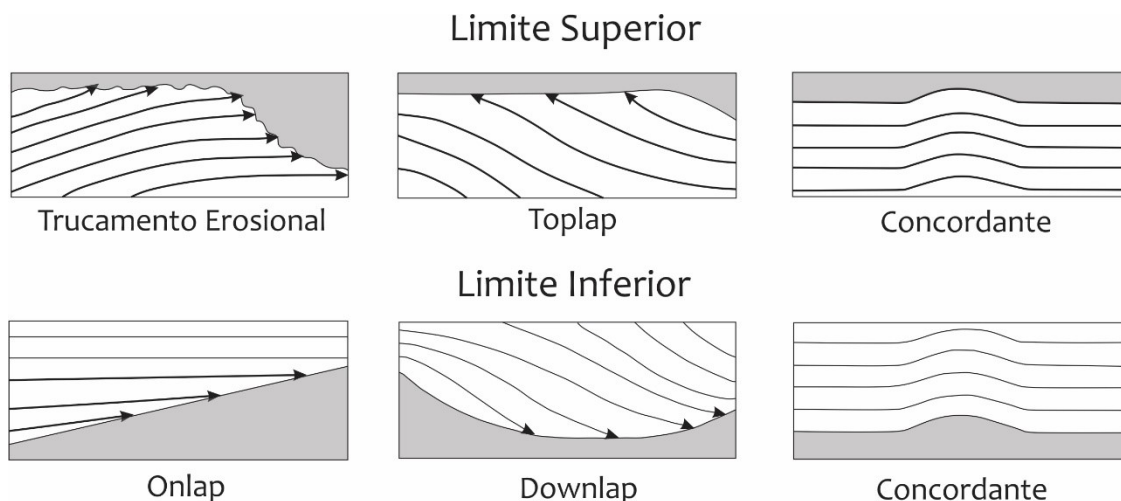


Figura 3.4 – Padrões das terminações dos refletores contra os limites superior e inferior das sismossequências (Mitchum Jr. *et al.*, 1977a; Severiano Ribeiro, 2001).

Após a identificação dos limites das sequências sísmicas é importante caracterizá-las segundo suas sismofácies. As fácies sísmicas ou sismofácies correspondem a um conjunto de reflexões sísmicas com características próprias que as diferenciam dos conjuntos de reflexões adjacentes (Brown Jr. & Fisher, 1980; Severiano Ribeiro, 2001; Mitchum Jr. *et al.*, 1977b). A identificação dessas feições se faz por meio do reconhecimento dos padrões de reflexões sísmicas e das suas interrelações dentro de uma sequência sísmica. Isso permite propor as devidas interpretações sedimentológicas, tais como inferências sobre os sistemas deposicionais, possíveis fontes de sedimentos e ambiente geológico (Mitchum Jr. *et al.*, 1977a).

Para Severiano Ribeiro (2001), a configuração interna das reflexões é o parâmetro que melhor as caracteriza. Abaixo estão resumidos os principais tipos de configurações de sismoefeições (figura 3.5).

Além das configurações internas, a caracterização das configurações externas ou suas geometrias também é um fator relevante na análise sísmica. As principais geometrias das sismossequências são: lençol, lençol ondulado, cunha, banco, lente, de preenchimento e montiforma (figura 3.6).

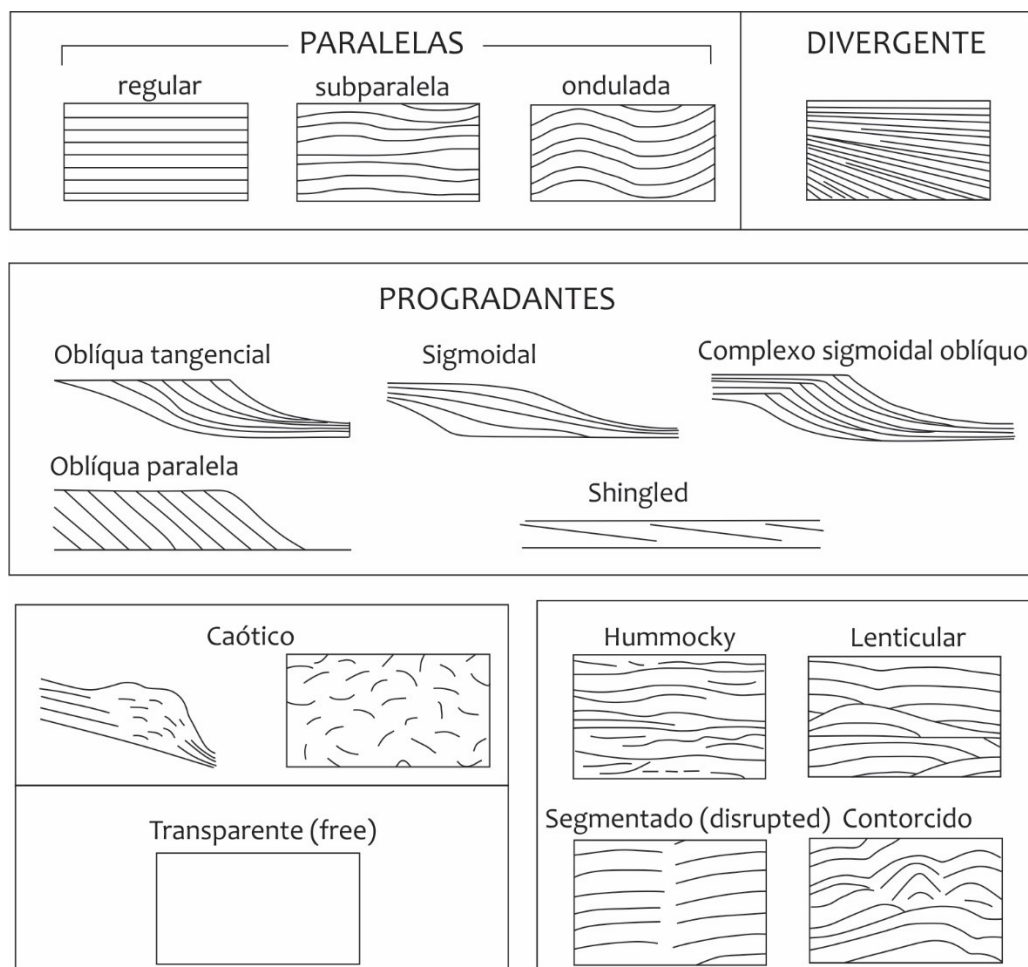


Figura 3.5 – Principais tipos de configurações internas das reflexões que caracterizam as seqüências sísmicas (Mitchum Jr. et al., 1977b; Severiano Ribeiro, 2001).

A análise sismoestratigráfica permite ainda reconhecer importante que é o das superfícies cronoestratigráficas que individualizam os tratos de sistemas. Essas superfícies são as discordâncias, superfícies transgressivas e as de máxima inundação marinha ou superfícies de *downlap*, segundo Emery & Myers (1996).

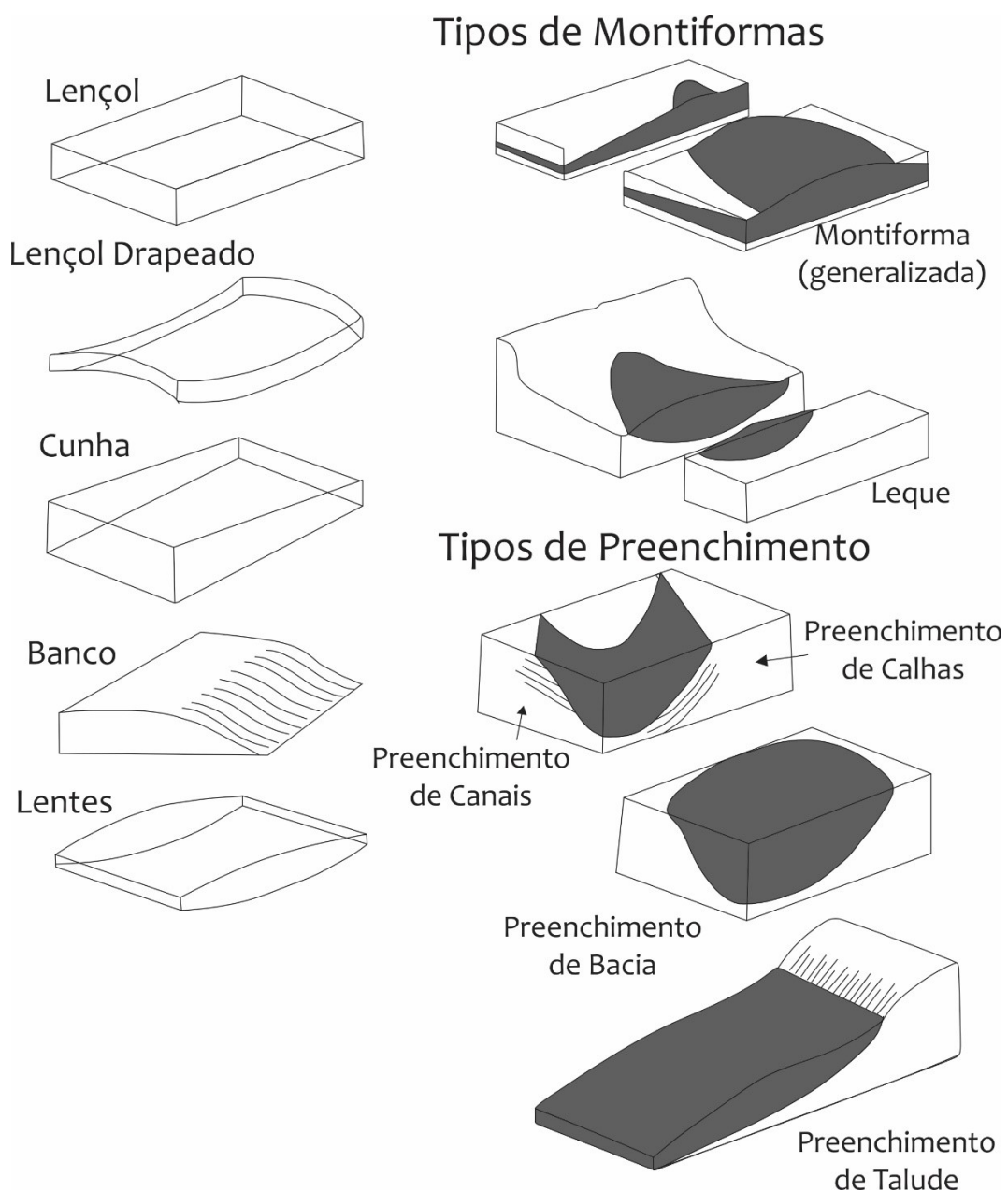
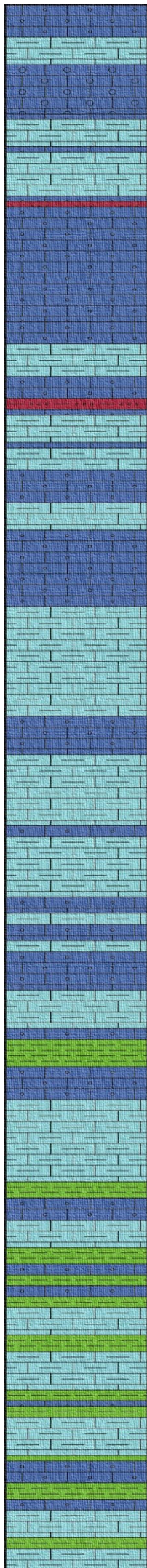


Figura 3.6 – Principais tipos de configurações externas ou geometrias típicas de algumas sismofácies descritas nos dados sísmicos. (Mitchum Jr. et al., 1977b; Severiano Ribeiro, 2001).



CAPÍTULO 4 – ARTIGO CIENTÍFICO

*Análise estratigráfica da plataforma carbonática Ponta do Mel, Albo-
Cenomaniano da Bacia Potiguar, NE do Brasil*

4. ARTIGO CIENTÍFICO

Stratigraphic analysis of Ponta do Mel carbonate platform, Albian-Cenomanian of Potiguar Basin, NE Brazil

Ana Karoliny Alves de Medeiros^{a*}, Valéria Centurion Córdoba^{a,b}

^a Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^b Department of Geology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

*Corresponding author. Present address: Laboratory of Geology and Geophysics of Petroleum, Federal University of Rio Grande do Norte, University Campus, Lagoa Nova, PO Box 1596, CEP 59078-970, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil. Tel.: +55 (084) 3342-2332 (Extension 317). E-mail address: karolinyana@ufrn.edu.br (Ana Karoliny Alves de Medeiros); vcc2018@ufrnet.br (Valéria Centurion Córdoba)

ABSTRACT

This work intends to understand how the Ponta do Mel carbonate platform was implanted, to characterize its depositional model and its evolution in the light of modern stratigraphy, as well as to understand the stratigraphic relations with beneath, overlapping and contemporary units, from wells and seismic data. The focus area of this study corresponds to a belt in the offshore portion of the Potiguar Basin, which runs parallel to the shoreline, about 40 km from it. The carbonate rocks of the Ponta do Mel Formation date from the Late Albian and, similar to what occurs in the other basins of the Brazilian continental margin, their deposition is related to the separation events of the African and South American continents. In the stratigraphic analysis of the wells (1D analysis), it was possible to characterize carbonate lithofacies, that are the predominant, as well as mixed and siliciclastic lithofacies. It was also possible to individualize shallowing upward cycles and cycle sets, which were associated with the identified systems tracts. In the seismic stratigraphic analysis, in the same way, four seismic facies were visualized, which, in general, are related to the tractive processes involved in the deposition of the carbonate, mixed and siliciclastic lithofacies, defined in the 1D analysis. The integration of the results from the well data analysis to the seismic stratigraphic analysis allowed to understand that the studied interval, which coincides, in lithostratigraphic terms, with the Ponta do Mel Formation, represents a complete depositional sequence, here referred to as the Albian-Cenomanian Sequence, formed by the Lowstand Systems Tract (LST), Transgressive Systems Tract (TST), and Highstand Systems Tract (HST). The sedimentation history of the Ponta do Mel unit started from the deposition of siliciclastic and carbonate lithofacies in a shallow water platform environment, followed by the increase of the accommodation space, in a transgressive phase, where there was the deposition of a thick interval of deeper water lithofacies, represented mainly by calcilutites and pelitic rocks, for that, thus, at the end of this interval, facies of coarser granulation, represented mainly by thick calcarenites layers, and sometimes calcirrudites, started to dominate the platform scenario, denoting a regressive phase and thus ending the Albian-Cenomanian Sequence.

Keywords: Carbonate stratigraphic sequence, Ponta do Mel Formation, Albian-Cenomanian, Potiguar Basin

4.1 INTRODUCTION

The Potiguar Basin, located in the extreme Northeast of Brazil, on the border between the east and equatorial Brazilian margins, presents a stratigraphic record separated in three supersequences: a Rift Supersequence, from Early Cretaceous age; a Post-Rift Supersequence; and Supersequence Drift, which extends from Albian to Recent (Pessoa Neto *et al.*, 2007). The most significant carbonate sequences in the Potiguar Basin were installed during a Drift stage. At this time, the tectonic regime controlling the basin was the thermal subsidence and isostatic compensation (Chang & Kowsmann, 1987, Chang *et al.*, 1992), typical of the passive margin context. Initially, it occurred the installation of a fluvial system that gradually changed, towards the sea, to a shallow mixed-siliciclastic shelf, with the installation of a carbonate rimmed-shelf sedimentation and a slope/basin system pronounced by the formation of underwater canyons with turbiditic sedimentation associated. Later, the system - constituting by the Açú, Ponta do Mel and Quebradas formations - was gradually drowning by the great transgression of the late Cretaceous (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

Tibana and Terra (1981) identified two carbonate sequences in the Potiguar Basin: the first, from the Albian-Cenomanian age, defined as Ponta do Mel Formation, and the second comprising the Jandaíra Formation, from early Turonian to early Campanian.

The purpose of this paper is to understand the implantation of the Ponta do Mel carbonate rimmed-shelf: (i) defining to the studied section its sequence stratigraphic units and their chronostratigraphic surfaces, as well as (ii) understanding the stratigraphic relations with the other units and, as final product, (iii) to propose stratigraphic models that depict the evolution of this platform during the Albian-Cenomanian, in the Potiguar Basin.

This work is justified because, compared to the Jandaíra unit, the Ponta do Mel Formation has few published works and because it serves as an analogue for the main oil producing fields in the Campos and Santos basins.

The focus area of this study corresponds to the offshore portion of the Potiguar Basin, which is parallel to the shoreline, about 40 km from the coast, and concerns the spatial portion of the basin where this unit occurs.

The figure 4.1 contains the map with the location of the study area of the wells and seismic lines, database of this work. The highlight wells and seismic sections represent the data that it was used to present the interpretation since it is inserted in the sector of the study area where seismic resolution is better and intercepts reference wells.

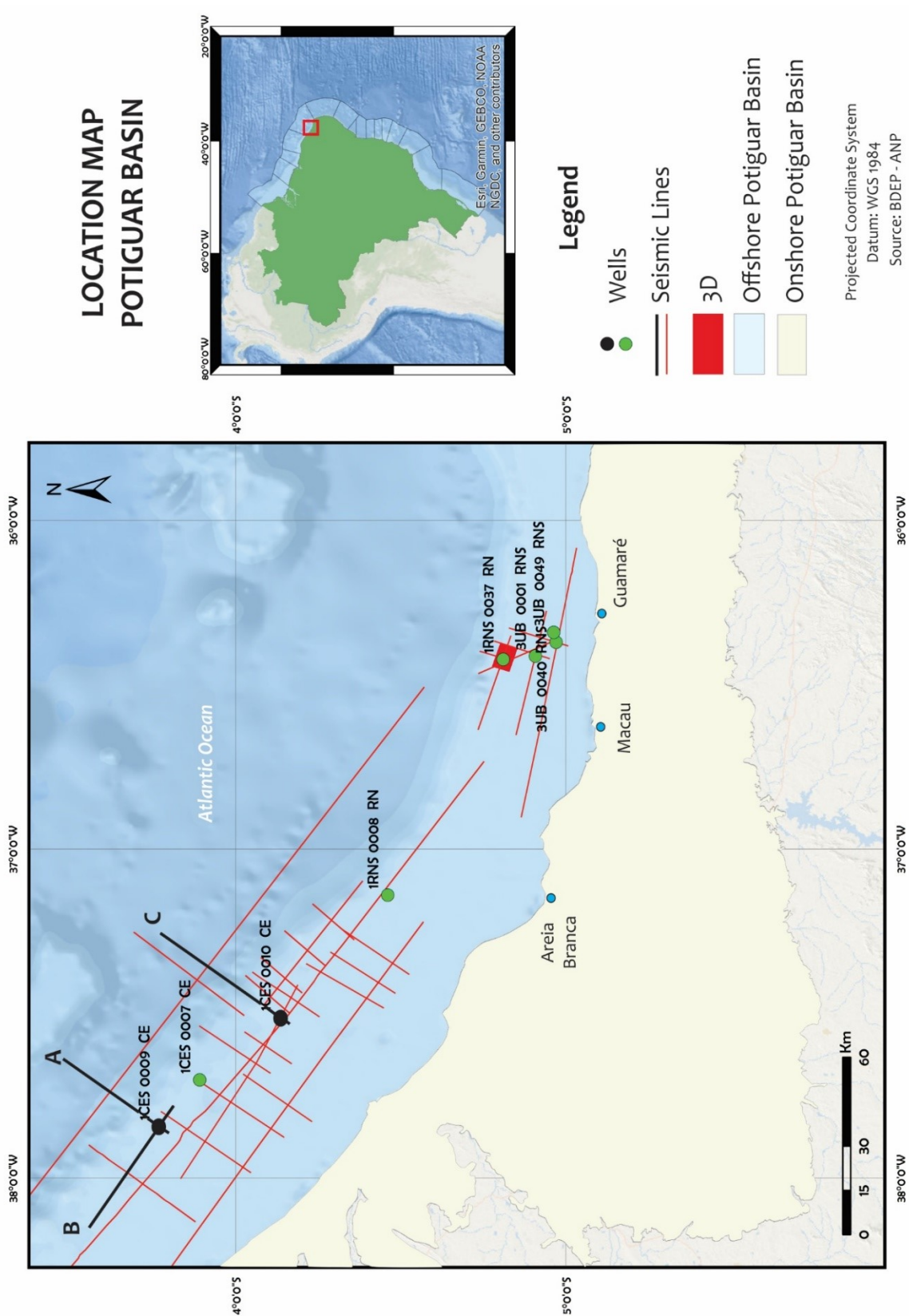


Figure 4.1. Location map of the study area, with location of wells and seismic lines, which represent the database of this research. The wells and seismic data in black color were chosen to be presented

4.2 MATERIAL AND METHODS

As the database, this present research has information from wells and seismic, acquired through an academic quota from the Exploration and Production Database (BDEP) from ANP (Oil, Natural Gas and Biofuels National Agency). These data are composed by 8 wells from the offshore Potiguar Basin, 22 post-stacking seismic lines and one 3D seismic volume approximately 100 km². Two wells and three key seismic lines were chosen from this database to be presented in this paper (figure 4.1).

In order to conduct this research, four work steps were organized in this way: (1) preliminary bibliography survey, and data selection, (2) 1D stratigraphic analysis stage, (3) 2D stratigraphic analysis, (4) stage of data integration and stratigraphic synthesis.

Stage of previous bibliography survey and data selection

This phase involved the bibliographic survey, including the technical texts, which approach the origin and evolution of the Potiguar Basin, the stratigraphy, the structural framework, facies and the depositional systems of the Ponta do Mel carbonate unit, as well as references about theoretical basis on the geophysical well profiling, focusing on gamma ray profiles, and on the concepts and premises of Sequence Stratigraphy. This stage was also destined to database organization, which involved the selection and data request to BDEP (Exploration and Production Database) from ANP. These data include composite profiles, general files and well folders, as well as geochemical data and .sgy files from the seismic package.

1D stratigraphic analysis stage

This stage was intended for well analysis, which began with the well vectorization and construction of the 1D diagrams. On these, the lithofacies were described, taking into account the lithological and gamma ray profiles, contained in the composite profiles, as well as the descriptions from drill cuttings and cores coming from well folders. We also compiled and reinterpreted the literature information about depositional systems, delineated the upward shallowing cycles, cycle sets, the systems tracts and depositional sequence, and positioned the key surfaces.

2D stratigraphic analysis stage

This stage consisted by 2D seismic interpretation in the Petrel software and by defining the seismic facies, geometry, reflector terminations and the sequence boundaries.

Data integration and stratigraphic synthesis stage

This step was aimed to integrating the results obtained in each previous step, in order to elaborate the evolutive models idealized for the Ponta do Mel Formation.

4.3 GEOLOGICAL SETTING

The Potiguar Basin comprises two segments, one onshore and one offshore, covering mostly the Rio Grande do Norte State and, partially, the Ceará State. Its boundaries are south, east, and west with the crystalline basement, extending north to the 2000 m isobath. The Alto de Fortaleza defines the western boundary with the Ceará Basin, and the Alto de Touros, eastern boundary. The approximate area of the basin is 48,000 km², which 45% are onshore and 55% offshore (Pessoa Neto *et al.*, 2007). The stratigraphic record includes three supersequences, being its sedimentary fill closely related to the different phases of its tectonic evolution.

The Potiguar Basin had its origin directly linked to the evolution of the Brazilian east and equatorial segments, from the separation of the South American and African plates, during the Gondwana break, culminating in the opening of the South Atlantic. This event corresponds to the same one that characterized the installation of the Recôncavo, Tucano, Jatobá, Rio do Peixe, Araripe and Sergipe-Alagoas basins. These basins, along with the Potiguar Basin, make up the Northeast Brazilian Rift System (Matos, 1987).

According to Pessoa Neto *et al.* (2007), the carbonate rocks of the Ponta do Mel Formation were deposited at the end of the Albian, approximately between 105 and 99 Ma. Campos (2012) explains that during the Campanian the Potiguar Basin was exposed and part of the carbonate deposition of the Ponta do Mel unit was submitted to erosion. Tectonic events have also affected their rocks, from the Late Cretaceous to the Recent. Due to the high chemical alteration of the carbonate rocks, the diagenesis and the tectonic processes modified the original structure of deposition.

Tibana and Terra (1981) discuss that the deposition of this carbonate sequence, like that occurring in the other basins of the Brazilian continental margin, is related to the continental separation events. According to the same authors, the first carbonate deposits are from shallow water and consist of calcarenites to molluscs and oncoliths, dolomitized, which occur intercalated to the Açú Formation siliciclastics, after a regressive cycle.

Subsequently, a period of great subsidence begins, predominating the deposition of

terrigenous with clay, which were gradually replaced by limestones with considerable content of planktonic foraminifera, representing the transgressive phase of the sequence. As the shallow shelf facies were prograding over the more distal sediments, the regressive phase of the sequence began.

At the beginning, there were conditions for the development of algae banks positioned at the shelf margin, which furthered the installation of a lagoon in its rearward, supporting diagenetic processes such as the dolomitization, commonly described in the Ponta do Mel Formation.

At a subsequent stage, the shallow shelf reaches a more homogeneous gradient, where high-energy deposits were formed, with algalic and oncolithic bioclasts, depending on environmental conditions. In the upper part of this cycle, the predominance of microfacies rich in oncoliths with the presence of *sp. Trocholina* (Tibana and Terra, 1981) was identified.

The occurrence of this unit is very limited. To the south and southwest, carbonate facies grade into siliciclastic facies (Tibana and Terra, 1981). To the north, the Ponta do Mel Formation tends to decrease its occurrence to short distances, until disappearing. It is in this direction that rocks of Upper Cretaceous are usually found in direct contact with those rocks of Aptian stage.

For Terra (1990), the sedimentary history of the unit started from the deposition of shallow water sediments, which were deposited throughout the shelf. With the increase of subsidence, a large thickness of deep-water sediments was deposited to the north of the Ubarana fault system, unlike the southern portion, where shallow water sediments were less expressive and later eroded without leaving a geological record. In a second stage, with the rise of sea level, the sedimentation was restarted, establishing an episode of sediment progradation and the development of a thick carbonate section.

According to Dias-Brito (1985), the lower portion of the upper section of the Ponta do Mel Formation, represents low energy and deep-water environments dominated by carbonate mud: mudstones and wackestones facies with planktonic foraminifera and pterionelids. Meanwhile, the upper portion of the unit shows mainly a shallow water environment dominated by grains: grainstones facies and ooidal-oncoidal packstones commonly with red algae and some benthic foraminifera. Granier *et al.* (2008) suggests that the boundary between these subunits of the Ponta do Mel Formation seems to register a rapid sea level lowering, which is a forced regression, and is therefore interpreted as an important sequence boundary.

In more recent work, Cazarin *et al.* (2014) defined the Ponta do Mel Formation as a

carbonate shelf with a bioconstructed border, in which seven stratigraphic surfaces were identified, two lithostratigraphic, four unconformities with karstic features and a transgressive surface. These authors also recognized eleven lithofacies based on data from five cores. These lithofacies were grouped into four facies associations and correlated with three seismic facies: (i) bioconstructed facies and reefs, associated with chaotic seismic facies type; (ii) grainstones, which constitute bars, associated with sigmoidal and lenticular seismic facies types; (iii) lagoon wackestones and mudstones and (iv) mudstones to tidal plain bird's-eye. The last two ones associations related to parallel/subparallel seismic facies.

4.4 1D STRATIGRAPHIC ANALYSIS

4.4.1 Lithofacies

Based on the descriptions of the drill cuttings and sparse samples, and the information contained in the composite profiles (natural radioactivity values indicated in the gamma ray and lithological profiles) of the all wells analyzed, it was possible to identify eight lithofacies for Ponta do Mel Formation, being three carbonates, one mixed and four siliciclastics. The figures 4.2 and 4.3, constituting the 1D Diagrams of the selected wells, show the typical responses of the gamma ray profiles to these lithofacies and how they are disposed vertically.

Carbonate facies

Calclutites - lithofacies that normally present a whitish gray color, light gray to light brown, being dominantly composed of carbonate mud, whose granulometry corresponds to silt and clay fraction, locally being able to present bioclasts. In terms of sedimentary structures, core descriptions indicate massive bedding, bioturbations or even bird's-eye. In the analyzed wells, this lithofacies occurs vertically associated to calcarenites or marls. The values of radioactivity indicated in the profiles of gamma rays are usually higher than sandstones, calcarenites and calcirrudites, but lower than siltstones, marls and shales.

Calcarenites - lithofacies that shows brown cream coloration, being able to present also cream coloration to light gray. Their lithotypes exhibit granulometry ranging from medium to coarse sand and contain as predominant grains fragments of bivalves and algae; oolitic grains are sometimes predominant. They are equivalent to grainstones and packstones, according Dunham (1962), and are partially recrystallized. This lithofacies occurs

associated with siltstones, calcilutites and shales. The gamma ray profiles for this lithofacies tend to show lower values among the carbonate lithotypes.

Calcirrudites - lithofacies showing a light brown to dark color, presenting granule size to pebble and fine to medium sand matrix. It contains as main components intraclasts of calcilutites and calcarenites, as well as fragments of bivalves and algae, whose diameters can reach 5 cm. In the cores of some wells, there are descriptions of fractures, some of which are filled with calcitic cement. Gamma ray profiles show slightly higher values of radioactivity than calcarenites.

Mixed facies

Marls - lithofacies with gray coloration, being composed of a mixture of carbonate and siliciclastic mud, with granulometry equivalent to silt and clay fraction. They occur commonly intercalated in the wells with calcarenites, calcirrudites and shales, presenting values relatively high in the gamma ray profiles, however lower than the values of the shales and siltstones.

Siliciclastic facies

Shales - lithofacies that have a medium to dark gray coloration. They are described as placoids with pyrites, occurring intercalated to the calcilutites, calcirrudites and calcarenites. Among the other lithotypes, those have the highest values in the gamma ray profiles.

Siltstones - less common lithofacies, described as having a light brown color and appearing normally intercalated to calcarenites, close to the top of the studied formation. Gamma ray profiles show relatively high values of radioactivity.

Sandstones - this lithofacies occurs in the lower portion of the studied formation, having been identified only in one of the wells for the interval analyzed, which among the other ones studied is located closer to the current coastline. These sandstones occur intercalated with calcarenites, calcilutites and, mainly, shales. In the profiles, the gamma ray values are the lowest identified.

Conglomerates – the rarest lithofacies among to the other ones, associated with the upper boundary unconformity of the Ponta do Mel Formation. It presents granulometry ranging from granule to pebble and sandy matrix, being composed of angular to subangular grains. In the gamma ray profiles, these conglomerates have low values, similar those shown by calcarenites.

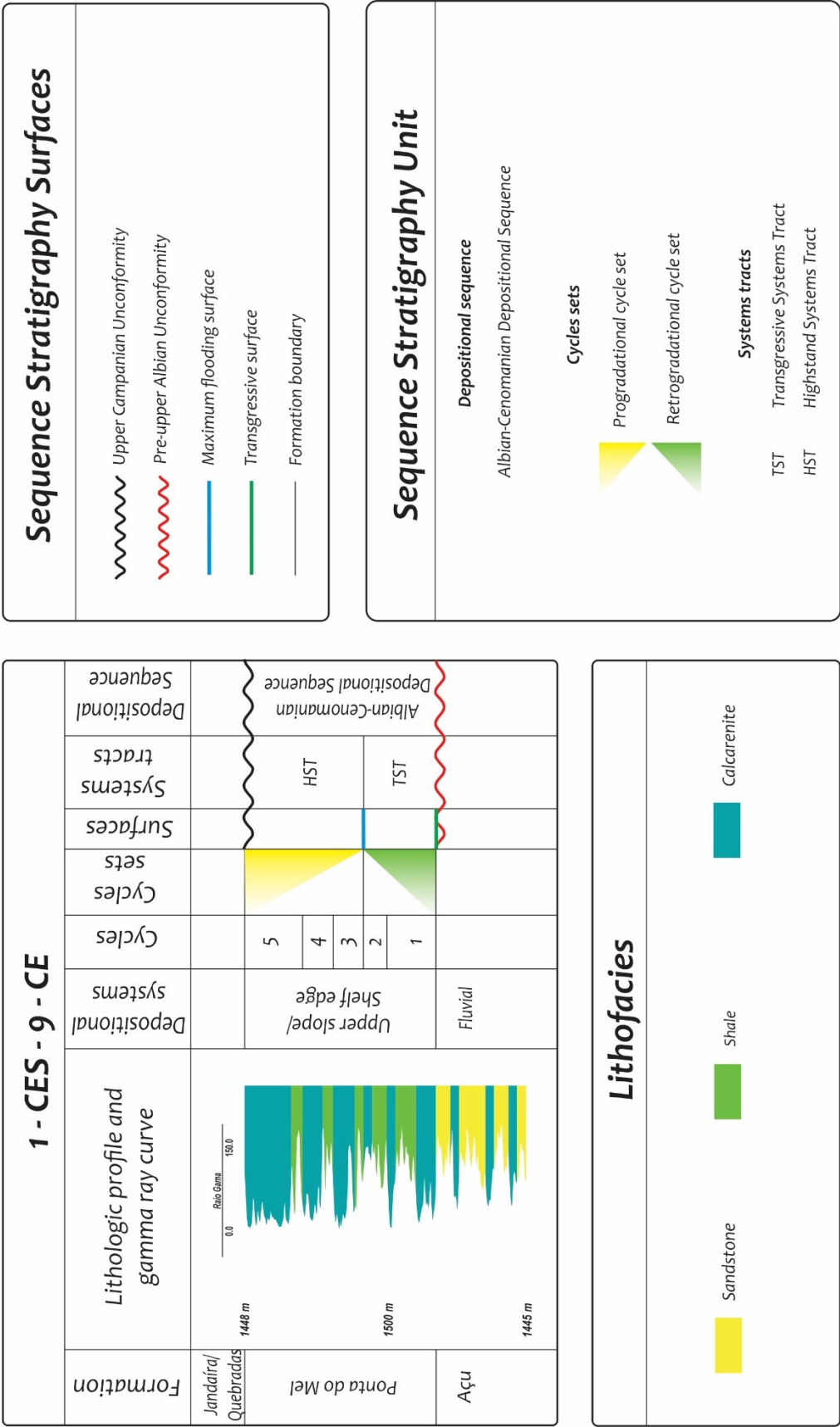


Figure 4.2. 1D Diagram of 1-CES-9-CE reference well, showing the lithologic profile and the gamma curve, as well as the interpretations about the depositional systems, cycles sets, surfaces, systems tracts and depositional sequence. The location of this well can be consulted at the figure 4.1

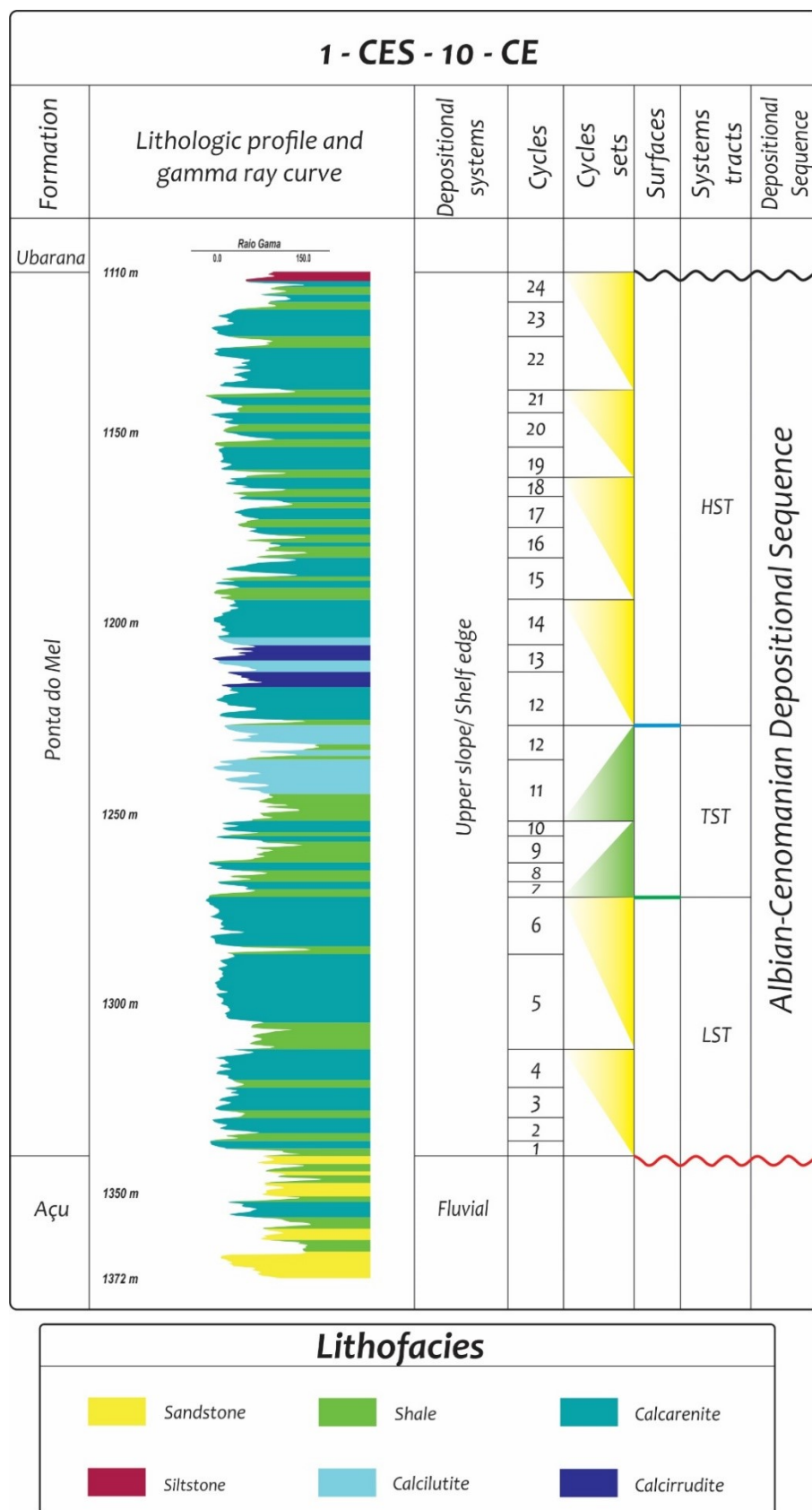


Figure 4.3. 1D Diagram of 1-CES-10-CE reference well, showing the lithologic profile and the gamma ray curve, as well as the interpretations about the depositional systems, cycle sets, surfaces, systems tracts and depositional sequence. The location of this well, and the legend of sequence stratigraphy surfaces and units can be consulted at the figure 4.1.

4.4.2 Sequence stratigraphy units and surfaces

The stratigraphic analysis of the wells began with the definition of shallowing upward cycles, which constitute successions that begin with facies deposited in relatively more distal portions, and finish at the top with facies deposited in the more proximal portions. They are bounded by marine flooding surfaces. These cycles differ from one another, depending on the depositional context involved, and may be thickening or thinning towards the top. In the wells analyzed, they were delimited and indicated by a growing numbering, which has no dating or correlation connotation, only to indicate the vertical succession of the cycles (figures 4.2 and 4.3). Then, based on the stacking pattern, the cycle sets were defined. Those intervals formed by cycles sets with retrogradational pattern were associated with the Transgressive Systems Tract, and in the other hand, those intervals composed of cycles sets with progradational pattern were related to the Lowstand Systems Tract and to Highstand Systems Tract. These systems tracts integrate the only depositional sequence defined for the interval Albian-Cenomanian, corresponding to the Ponta do Mel Formation, in the wells studied, making about 6 Ma and, thus, constituting a second order cycle.

The figure 4.4 illustrates the nine major types of shallowing upward cycles identified throughout the section studied, organized according to the systems in which they occur.

4.4.3 Systems tracts

For a characterization of the systems tracts and consequently of the sequence of which they are included, it was used as reference the two wells presented previously (1-CES-9-CE and 1-CES-10-CE).

The Lowstand Systems Tract is represented, in the wells where it was recognized, by an interval in which the cycle sets exhibit a clear progradational stacking pattern. In well 1-CES-9-CE this tract was not identified. The cycles, in turn, were classified into five types, termed 1 to 5, with type 1 being formed in a relatively distal depositional context, and progressively up to type 5, whose development occurred in a more proximal depositional context (figure 4.4).

The type 1 cycle consists of shales and calcilutites, interpreted as upper slope at the base, followed by calcarenites, related to the shelf edge, towards the top. The type 2 cycle is characterized in that it contains the same upper slope lithofacies identified in the previous

cycle, but arranged in thinner layers, culminating in thicker levels of calcirrudites, and sometimes calcarenites, at the top. The type 3 cycle begins with calcarenites and calcilutites, interpreted as shelf edge, that turning to the lagoon calcilutites and to coastal systems shales. Entering more proximal systems, the type 4 cycle is represented by lagoon calcilutites that pass to shales and coastal systems sandstones.

Finally, the type 5 cycle is composed by shales at the base and sandstones towards the top, lithofacies interpreted as coming from coastal systems. According to the gamma ray patterns defined by Emery and Myers (1996), the cycles sets of this tract exhibit a cleaning-up trend, where the values of radioactivity tend to get lower to the top; such fact is compatible with the progradational stacking pattern exhibited by this systems tract. The basal boundary of this tract, which coincides with the sequence boundary, is marked by the Pre-upper Albian Unconformity. This unconformity records the passage of the Açu unit for the Ponta do Mel Formation. The upper boundary of this systems tract corresponds to the Transgressive Surface, which represents the drowning of this cycles set and the transition from a progradational to retrogradational interval.

Transgressive Systems Tract was recognized in all wells, composing a reduced interval, represented by one or two retrogradational cycles sets. The cycles making up these sets are very similar, only one cycle type was defined for this tract, called type 6 (figure 4.4). The type 6 cycle is generally characterized by the presence of shales and calcilutites towards the base, interpreted as from upper slope, ending in calcarenites at the shelf edge. The pattern in the gamma ray profiles displayed by the cycles sets is the dirtying-up type, where a significant increase of the base radioactivity values is observed towards the top. The dirtying-up type pattern is compatible with a retrogradational stacking intrinsic to the Transgressive Systems Tract. The basal boundary of this tract is represented by the Transgressive Surface and in the absence of the Lowstand Systems Tract, such as well 1-CES-9-CE, this boundary is made by a composite surface represented by the fusion between the Transgressive Surface and the lower sequence limit that corresponds to the Upper pre-Albian Unconformity. The upper limit represented by the Maximum Flooding Surface, positioned in the wells at a shale level whose value in the gamma ray profiles shows the highest one between the other levels. This surface is also marked by the transition from a retrogradational interval to another where the stacking pattern is progradational again.

The Highstand Systems Tract was recognized in all analyzed wells, characterized by an extensive interval formed by several cycles sets with progradational stacking pattern. It

was possible to recognize three cycle types, called types 7 to 9, with type 7 representing deposition in a relatively distal depositional context, type 8, which generated in an intermediate context, and type 9 formed in a more proximal depositional context (figure 4.4).

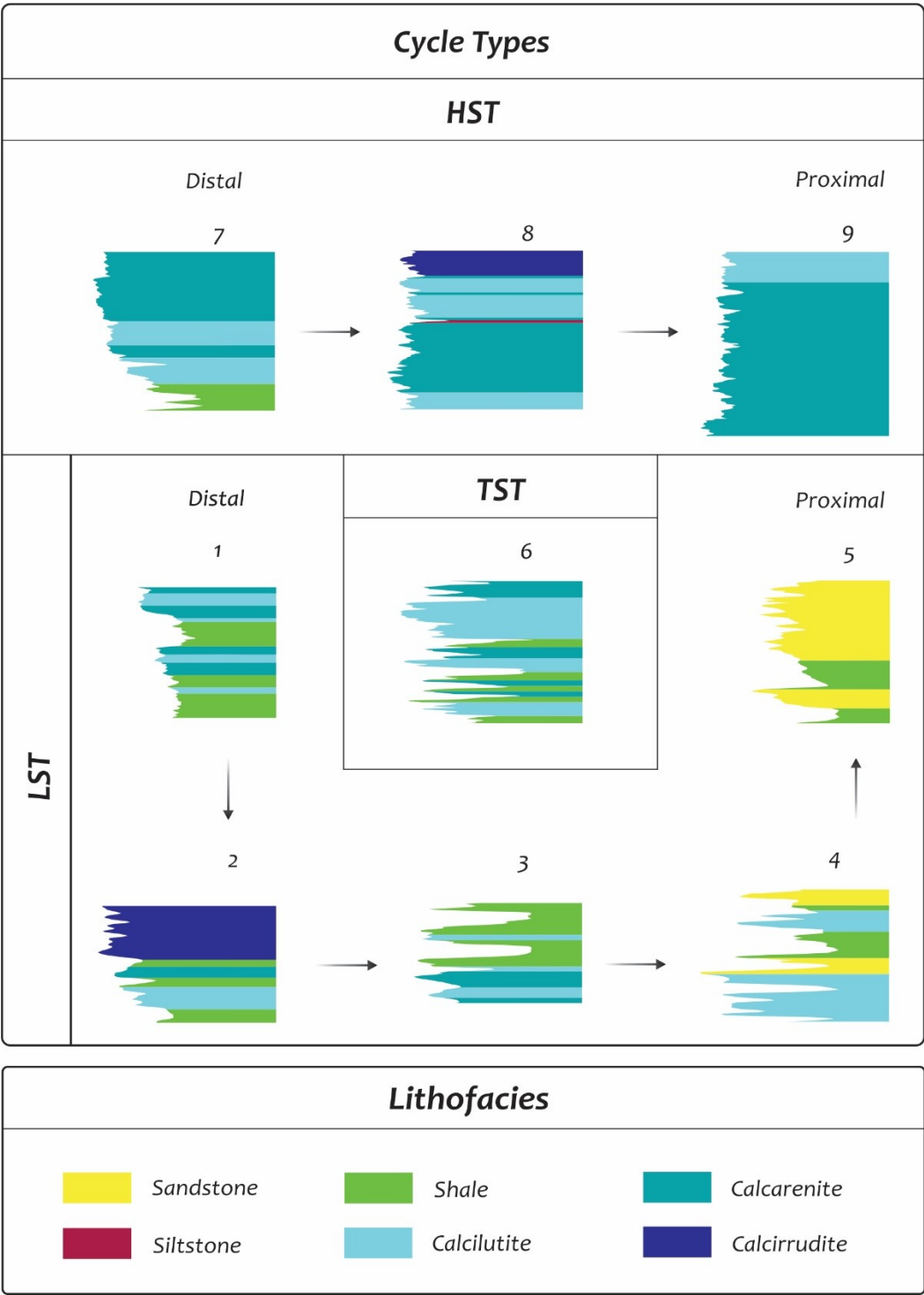


Figure 4.4. Different types of cycles interpreted in the studied wells for Lowstand System Tract (LST), Transgressive System Tract (TST) and Highstand System Tract (HST). The arrows in the figure indicate the transition of these cycle types in each of three tracts, going from distal to more proximal areas in the depositional scenery.

4.5 2D STRATIGRAPHIC ANALYSIS

From the seismic analysis and interpretation, it was possible to extract as products the identification and description of the main seismic facies that compose the Ponta do Mel unit, the delimitation of the study seismic sequence, which, in turn, has its limits corresponding to the interval of the lithostratigraphic unit, as well as its internal systems tracts. In this analysis, therefore, it was possible to track and correlate the chronostratigraphic surfaces and sequence stratigraphy units individualized from 1D analysis. For this, it was presented three seismic sections (seismic lines A, B and C; figures 4.5, 4.6 and 4.7), which two are in the dip direction and the other is a strike line (figure 4.1). These lines were chosen to show because they intercept reference wells, including more distal wells, as also because they are inserted in a sector where seismic resolution is the best within the acquired database.

As in the 1D analysis, one seismic sequence for the proposed study interval was identified. This sequence is bounded in the seismic, top and bottom, by two unconformities well marked by reflectors that present good continuity and high amplitude. Sometimes, these boundaries are marked by an erosive surface, sometimes even associated with incised valleys, which further facilitates their identification. At the top of the sequence, the unconformity boundary (Pre-lower Cenomanian) often adds to the upper Campanian Unconformity, confirming what was described in the 1D analysis. At the base, the unconformity boundary always appears represented by the Pre-upper Albian Unconformity.

In the seismic lines, the analysis showed that this sequence is mainly formed by four seismic facies. The first one, named seismic facies 1, is represented by a transparent to chaotic configuration, composed by reflectors with low continuity, low frequency and low seismic amplitude (figures 4.5 and 4.7). To this seismic facies were associated tractive processes involving carbonate and siliciclastic facies in platform regions. The second seismic facies, identified as 2, is characterized by a subparallel configuration, being formed by reflectors with low continuity, medium to high frequency and low to medium amplitude (figures 4.6 and 4.7), which it was interpreted as a result of tractive processes and of decantation, involving the deposition of carbonate facies in relatively deeper waters. Identified only in some sections, the seismic facies 3 can be described by a segmented configuration, being composed by reflectors that have low continuity, low frequency and high amplitude (figure 4.6), associated to processes involving on deposition of any described facies, that are in regions affected by faults. The fourth seismic facies, identified as 4, is represented by a parallel configuration,

being formed by reflectors with high continuity, high frequency and high amplitude (figures 4.5, 4.6 and 4.7). This one it was associated to tractive processes and bioconstructions, typically carbonates, developed mainly in regions of shelf edge and surroundings.

In general, the studied seismic sequence could be evidenced by good seismic continuity reflectors, which have high amplitude and, therefore, stand out from the surrounding reflectors. The other sequences above and below the studied one may also present reflectors with similar characteristics, but they are associated with the intervals that refer to the end of the transgressive drift stage (Jandaíra Formation) and the beginning of the regressive drift stage and the post-rift stage, respectively.

The seismic stratigraphy analysis allowed understanding that laterally, towards SW portion, the reflectors that characterizes the Ponta do Mel unit change their configuration to a new one, distinguished from the seismic facies 1, 2, 3 and 4. This one is characterized by parallel configuration, with lower amplitude, continuity and frequencies that can be interpreted as belonging to the intermediate portion of the Açú unit, which would be the chronostratigraphic correspondence, towards the shoreline, of Ponta do Mel Formation.

Both the lower and upper limits of the studied sequence may present erosive features interpreted as incised valleys, against which the reflectors end in truncation. The lower limit is characterized by reflectors with intermediate to low amplitude, which commonly coincides with the passage from the lower section of Açú Formation to the Ponta do Mel unit in the wells integrated into the seismic section.

Above this limit is the seismic interval interpreted as the Lowstand Systems Tracts (LST), which is identified both in the seismic sections studied and in the wells. This tract is commonly characterized in the sequence studied by low continuity, medium frequency and lower amplitude reflectors, and may include both seismic facies 1 and 2 (figure 4.7). This tract is limited at the top by the transgressive surface (black line in the figure 4.7). Above the transgressive surface there is a second seismic interval described as the Transgressive Systems Tract (TST). This tract is described by reflectors with intermediate continuity, high frequency and low to medium amplitude, marking the low acoustic impedance contrast that the lithofacies (calcilutites intercalated with shales) described in this interval may cause. The TST ends at the maximum flooding surface when the reflectors of the above interval end in downlap over this (figures 4.6 and 4.7).

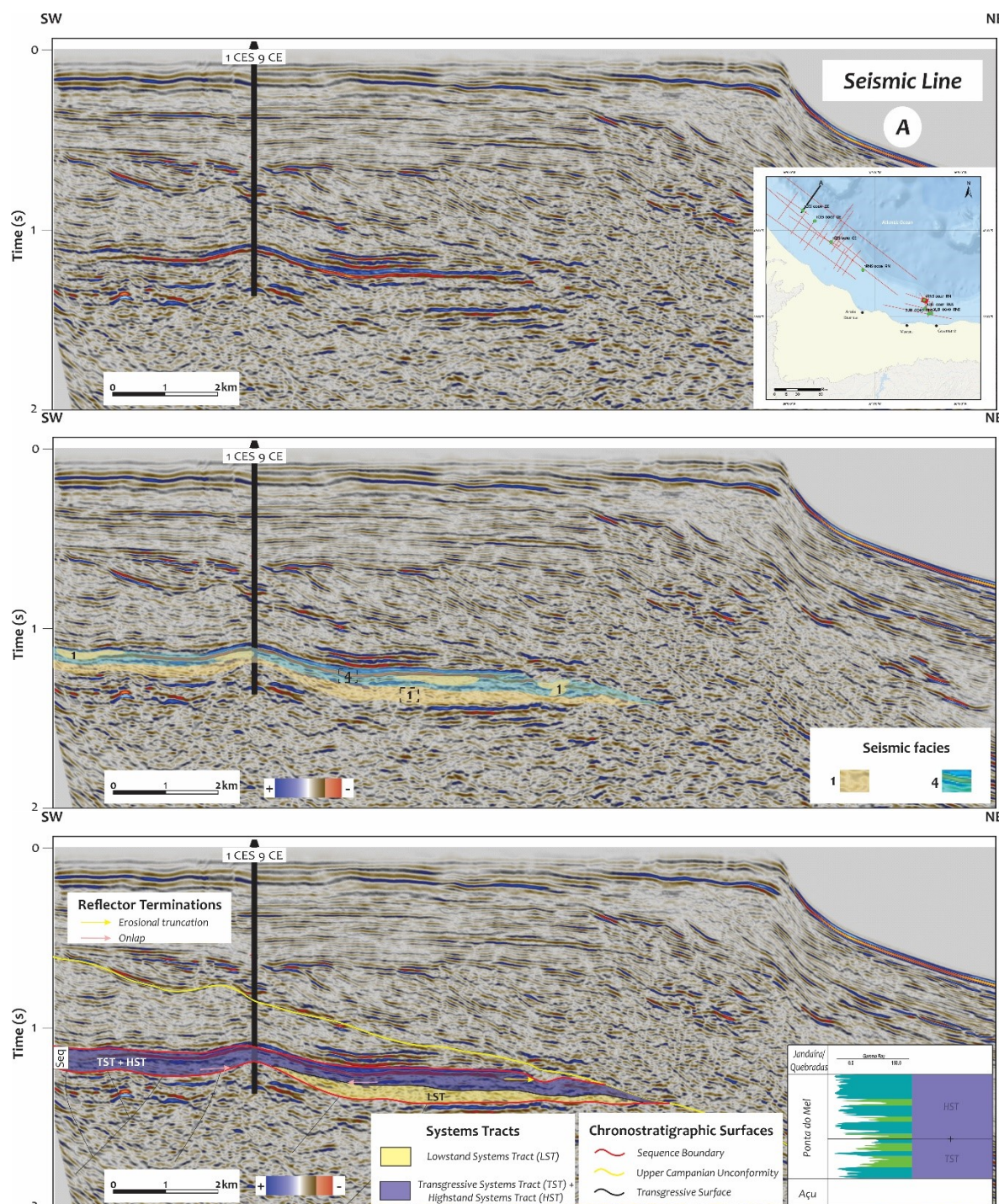


Figure 4.5. Interpreted seismic line A with location, seismic facies and its genetic units, chronostratigraphic surfaces and the reference well intercepted by the section. Faults are represented by black color lines in the figure. The interval termed *seq* in the figure corresponds to Albian-Cenomanian Sequence.

Finally, above the maximum flooding surface there is a third seismic interval, interpreted as the Highstand Systems Tracts (HST), easily recognized and delimited by reflectors of high seismic amplitude, with good continuity and high frequency, corresponding predominantly to seismic facies 4 (figure 4.7). These characteristics represent intercalations of thick calcarenites and calcirrudites layers with calcilutites and shales. This interval ends the

studied depositional sequence that delimits the unit.

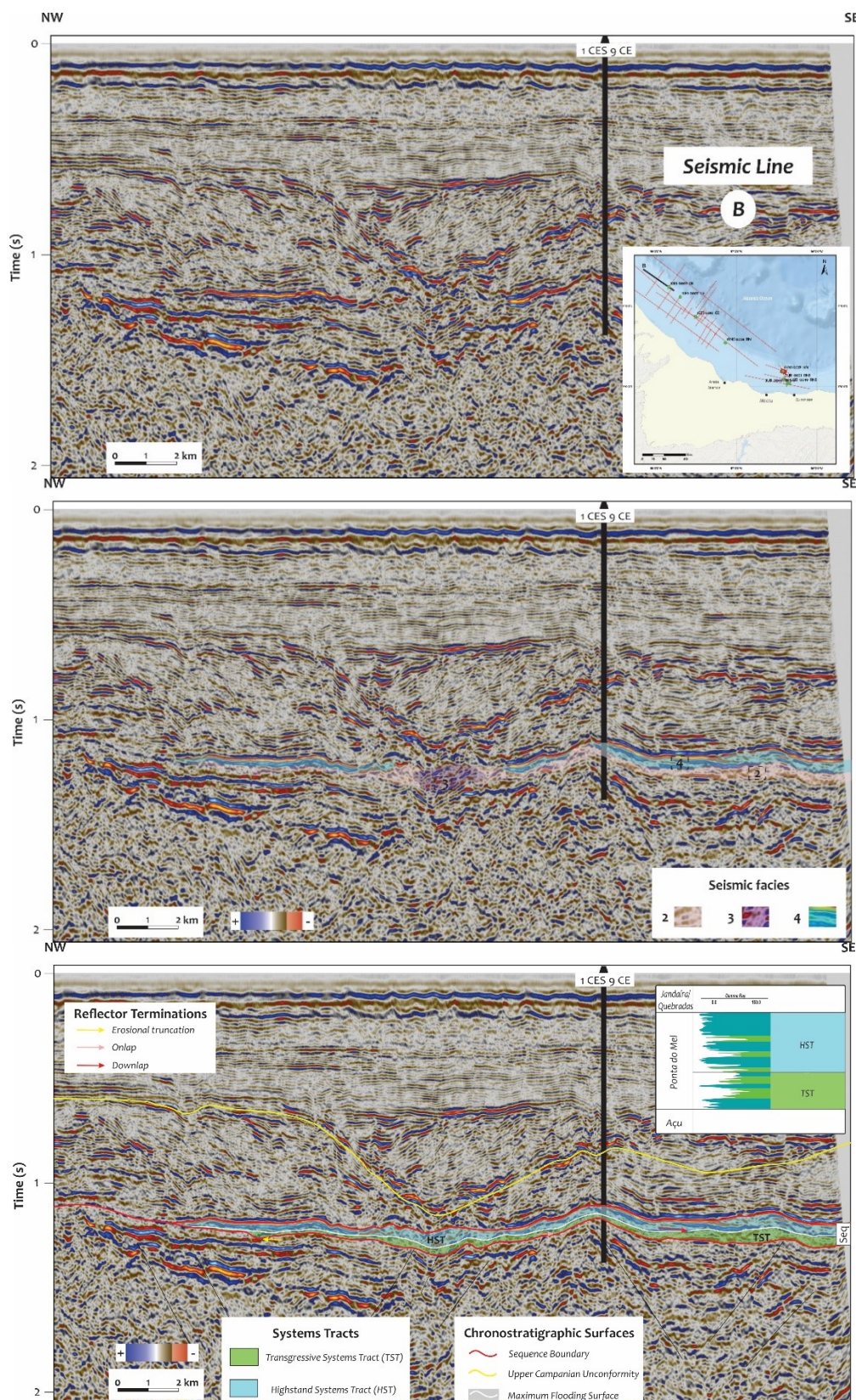


Figure 4.6. Interpreted seismic line B with identified seismic facies and its sequence stratigraphy units, the reflectors terminations, chronostratigraphic surfaces and the reference well intercepted by the section. Faults are represented by black color lines in the figure. The interval termed *seq* in the figure corresponds to Albian-Cenomanian Sequence. The upper Campanian Unconformity also marks a canyon installation.

It is observed that in general the LST tends to reduce in thickness, whereas the TST and HST both tends to thicken towards the top of the sequence and laterally. The analysis of the seismic facies, like the mapping of the sequence boundaries, allowed to interpret a bank geometry for the sequence that were studied (dip lines A and C; figures 4.5 and 4.7).

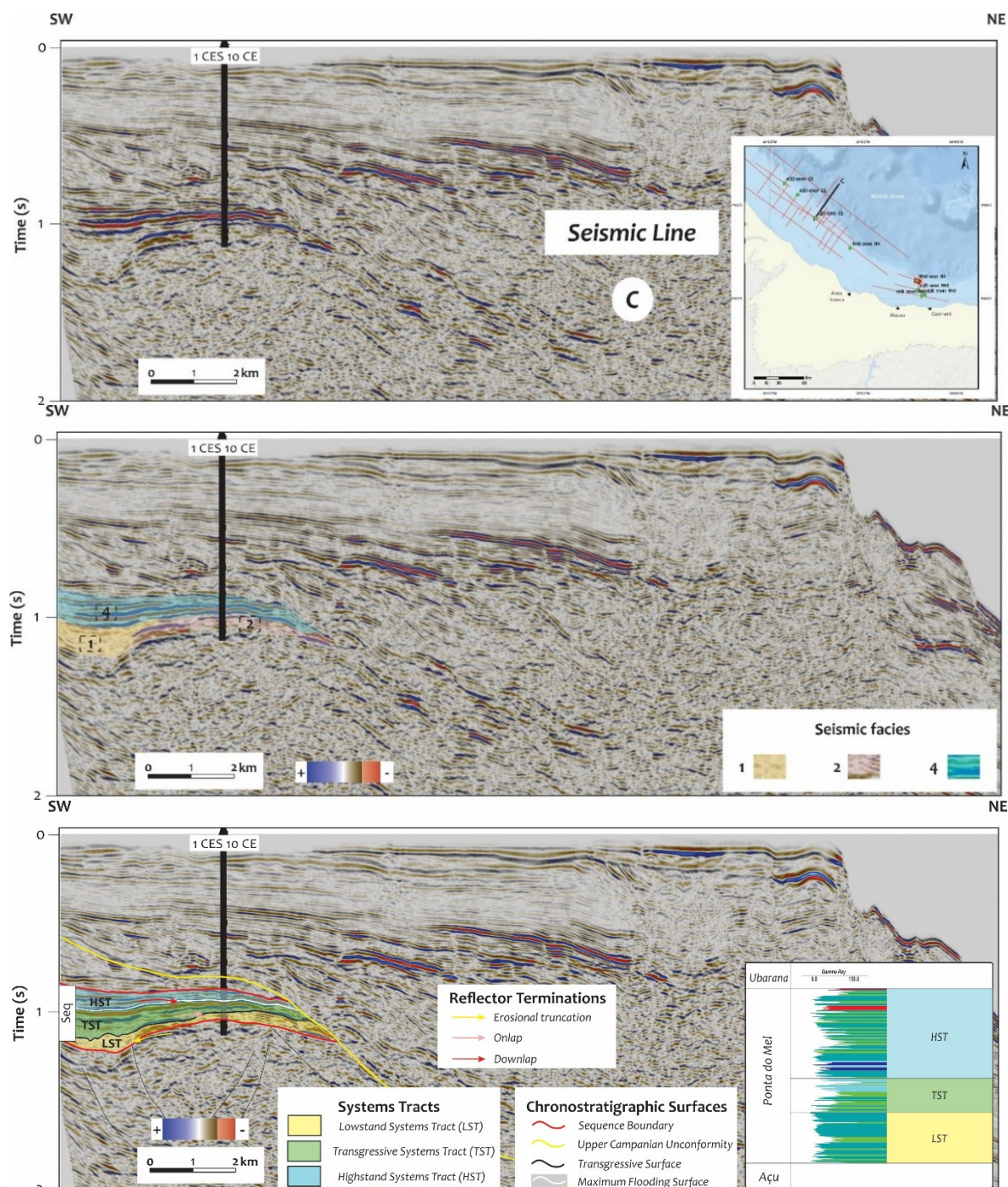


Figure 4.7. Interpreted seismic line C A with location, seismic facies and its sequence stratigraphy units, chronostratigraphic surfaces and the reference well intercepted by the section. Faults are represented by black color lines in the figure. The layer termed *seq* in the figure corresponds to Albian-Cenomanian Sequence.

4.6 DISCUSSION

The Albian-Cenomanian Sequence identified in this research involves a duration time of about 6 Ma, it has lithostratigraphic correspondence to the Ponta do Mel unit. Its lower limit in the wells studied happen with the Pre-upper Albian Unconformity, with underlying strata corresponding to the oldest section of the Açú Formation. The unconformity that limit it on the top involve variable gaps, which may reach up to 18 Ma, when there is overlying by the pelitic rocks of the Ubarana Formation. In this case, the upper Campanian Unconformity represent this limit and, as seen in the seismic analysis, associated with this unconformity are described fill geometries, related to generation of canyons, common in this area.

This sequence represents a complete sedimentary cycle formed by the Lowstand Systems Tracts, Transgressive Systems Tracts and Highstand Systems Tracts, which had their deposition associated with base level variations that, in this case, is the sea level (figure 4.8).

During the development of the Lowstand Systems Tract, basal unit of sequence, the base level dropped causing siliciclastic sedimentation, represent by sandy and muddy sediments from fluvial and coastal systems, to advance towards the platform. The depositional scenery idealized for this phase includes, in addition to the coastal system, a mixed platform with lagoon (or inner shelf), shelf edge formed by carbonate sand banks and bioconstructed reefs, slope and basin (figure 4.8). This interval is marked by intercalations between sandstones, pelites and carbonate rocks. This phase ends when the sea level began to rise, and the rate of accommodation is higher than the rate of sedimentary supply.

The Transgressive Systems Tract established in a context of rising sea level, which promoted the advance of shallow and deep marine carbonate sediments towards the continent and a considerable decrease in siliciclastic sedimentation. This phase is represented by a depositional scenery that present a wide carbonate rimmed shelf where the deposition of shales of slope and upper edge calcilutites prevailed (figure 4.8). Since the shallow marines and coastal facies were not described in the region of Ponta do Mel occurrence, it is suggests that these deposits have been removed by erosive events following the deposition of the sequence.

The Highstand Systems Tract, which ends the Albian-Cenomanian Sequence, is marked by a phase in which the rate of sedimentary supply started to supplant the creation of accommodation space, which led to a new episode of sediment progradation. Thus, the depositional scenario idealized for this moment integrates a wide carbonate platform of

shallow water, with extensive lagoons, possibly flanked by tidal flats with bars and reefs on its edges, some of which may occur exposed, beyond of slope and basin regions (figure 4.8). The interval for this tract begins with calcarenites and, sometimes, calcirrudites of shelf edge interleaved with calcilutites of upper slope, ending with calcarenites of shelf edge and calcilutites of lagoon or tidal flats, showing a significant progradation of these lithofacies, which marks the end of this system tract and also Albian-Cenomanian Sequence.

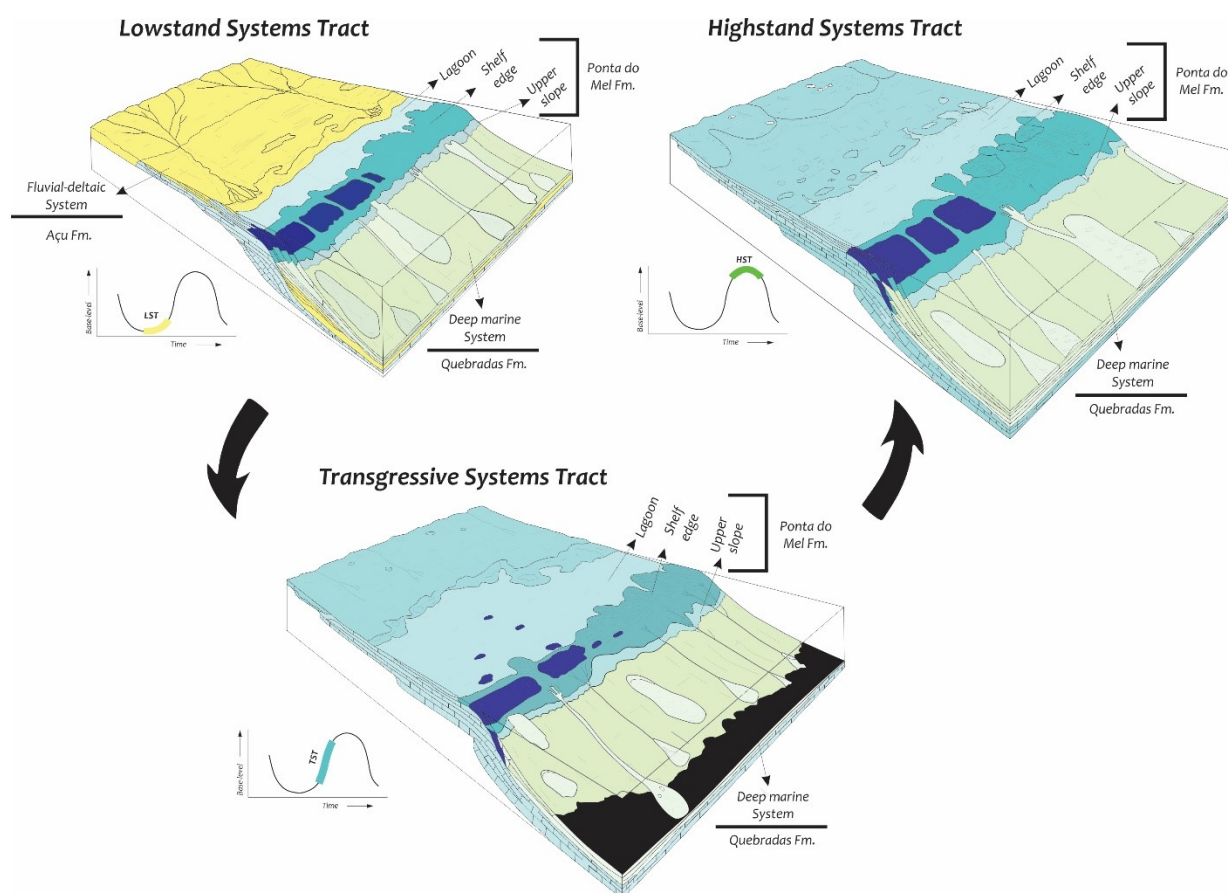


Figure 4.8. Depositional scenario to the Albian-Cenomanian Sequence evolving throughout the systems tracts (Adapted from Handford and Loucks, 1993).

4.7 CONCLUSIONS

The Albian-Cenomanian sequence corresponding in the studied sector, in lithostratigraphic terms, to Ponta do Mel Formation, could be characterized in the wells by a several shallowing upward cycles which could be grouped in cycles sets, sometimes presenting progradational stacking patterns related to the Lowstand Systems Tract and Highstand Systems Tract, sometimes presenting retrogradational patterns associated to the

Transgressive Systems Tract. This cycles sets and their systems tracts associated, in turn, typifies internally the depositional sequence that were studied. The integration of these results with seismic stratigraphy analysis allowed the mapping of the main chronostratigraphic surfaces, as well enable to interpret for Albian-Cenomanian Sequence a bank type geometry, typical of a rimmed shelf.

ACKNOWLEDGMENTS

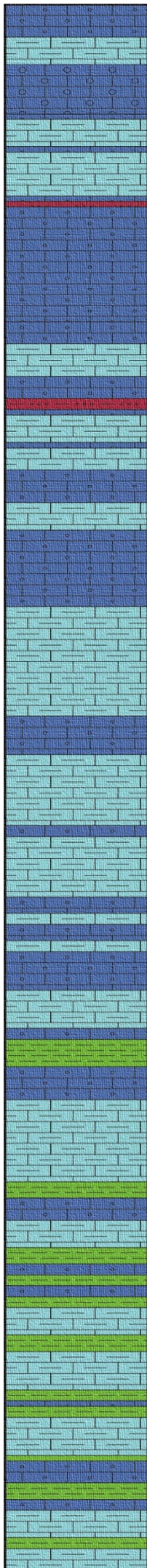
The authors would like to thank the Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) for granting the database, to PRH-229 program and the Laboratory of Petroleum Geology and Geophysics for the entire infrastructure for research development, as well as to the Federal University of Rio Grande do Norte. Thanks are also due to Fabio Bagni by the shared knowledge.

REFERENCES

- Campos S. 2012. Formação Ponta do Mel – Albiano da Bacia Potiguar: geoquímica na análise da evolução diagenética. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 189 p.
- Cazarin C.L., Bagni F.L., Garcia A.A.Z., Pessoa, V.C.O. 2014. Modelo deposicional e diagenético da Fm. Ponta do Mel, Bacia Potiguar – NE Brasil. *In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia*, Salvador, BA.
- Chang H.K., Kowsmann R.O. 1987. Interpretação genética das sequências estratigráficas das bacias da margem continental brasileira. *Rev. Bras. Geociências*, **17**: 74-80.
- Chang H.K., Kowsmann R.O., Figueiredo A.M.F., Bender A.A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift System: an overview. *Tectonophysics*, **213**: 97–138
- Dias-Brito D. 1985. Calcisphaerulidea e microfósseis associados da Formação Ponta do Mel – Bacia Potiguar, Brasil. *Coletânea de Trabalhos de Paleontologia*, Brasília, DNPM, 307-314.
- Dunham R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In: Ham W.E. (ed.) Classification of Carbonate rocks*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1, p. 108-122.
- Emery D., Myers K. J. 1996. *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science Uxbridge, Londres,

297 p.

- Granier B., Dias-Brito D., Bucur II. 2008. Calcareous algae from Upper Albian–Cenomanian strata of the Potiguar Basin (NE Brazil). *Geol Croat.* **61**:311–320.
- Handford C.R., Loucks R.G. 1993. Carbonate depositional sequences and systems tracts - responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. In: Loucks R.G., Sarg F. (eds). *Carbonate Sequence Stratigraphy – Recent Developments and Applications*. AAPG, Memoir 57, p. 3-41.
- Matos R.M.D. 1987. Sistema de “rifts” cretáceos do Nordeste Brasileiro. In: Seminário de Tectônica da Petrobras, 1, Rio de Janeiro, Atas, Petrobras/Depex, p. 126-159.
- Pessoa Neto O.C., Soares U.M., Silva J.G.F., Roesner E.H., Florencio C.P. Souza C.A.V. 2007. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**(2): 357-369.
- Terra G.J.S. 1990. Fácies, modelo deposicional e diagênese da sequência carbonática albo-cenomaniana (Formação Ponta do Mel) da Bacia Potiguar. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 153 p.
- Tibana P., Terra G.J.S. 1981. Sequências Carbonáticas do Cretáceo na Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da Petrobrás*, **24**(3): 174-183.
- Van Wagoner J.C., Posamentier H.W., Mitchum R.M., Vail P.R., Sarg J.F., Loutit T.S., Hardenbol J. 1988. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G.S.C., Posamentier, H.W., Ross C.A., Van Wagoner J.C. (eds). *Sea Level Changes – An Integrated Approach*. SEPM, Special Publications 42, p. 39-45.



CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Síntese conclusiva a partir das interpretações dos dados

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise e interpretação dos dados 1D foi importante na identificação e caracterização dos ciclos e conjuntos de ciclos que compõem a formação estudada, o que culminou na individualização de uma sequência deposicional.

A Formação Ponta do Mel pôde ser caracterizada nos dados de poços como sendo formada por vários ciclos de raseamento para o topo, os quais podem ser agrupados em conjuntos de ciclos, ora apresentando padrões de empilhamento progracionais (tratos de sistemas de Nível Baixo e de Nível Alto), ora com padrões retrogradacionais (Trato de Sistemas Transgressivos). Esses conjuntos de ciclos, portanto, se arranjam em tratos de sistemas, que, por sua vez, são os componentes que caracterizam internamente as sequências deposicionais. As litofácies descritas para a unidade englobam arenitos e folhelhos de sistemas litorâneos que chegam em direção à plataforma e representam, dessa forma, as porções mais proximais do modelo evolutivo; siltitos e calcilutitos de laguna e planície de maré; calcarenitos e calcirruditos de borda da plataforma; calcilutitos e folhelhos de talude superior. Distalmente, na passagem das porções de talude para a bacia, as litofácies correspondem a folhelhos de ambiente marinho profundo, correspondendo já à Formação Quebradas.

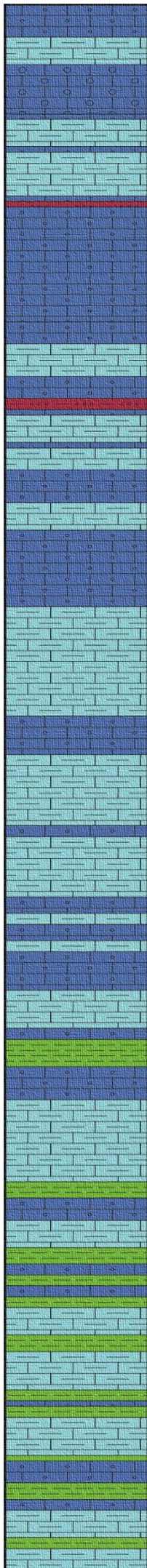
Da análise sísmica, quatro sismofácies foram identificadas e, portanto, caracterizam a sismossequência que representa o intervalo referente à unidade Ponta do Mel. Essas fácies sísmicas se relacionam a intercalações das litofácies citadas acima e identificadas na análise 1D, de forma que, num geral, também marcam processos trativos e de decantação em regiões de plataforma e adjacências.

A sequência aqui identificada foi denominada Sequência Albo-Cenomaniana, de acordo com o seu intervalo homônimo, e encontra-se posicionada acima da Discordância Pré-Albiano superior.

Durante o Trato de Sistemas de Nível Baixo, a queda do nível de base, provocou um avanço dos sistemas fluviais e litorâneos em direção à plataforma. Em seguida, após a fase de queda, o nível do mar começa a se elevar, fazendo com que a taxa de criação de espaço de acomodação suplante a taxa de aporte sedimentar havendo, então, amplo desenvolvimento da plataforma carbonática. Por fim, uma nova fase de diminuição na criação do espaço de acomodação se instala, provocando novamente progradação dos sedimentos, encerrando a Sequência Albo-Cenomaniana em um contexto deposicional onde impera uma expressiva

plataforma carbonática de águas rasas.

Por fim, a integração de todos os resultados, isto é, a análise de poços aliada a análise sismoestratigráfica, permitiu o mapeamento das principais superfícies cronoestratigráficas, bem como possibilitou interpretar para a Sequência Albo-Cenomaniana uma geometria do tipo em banco, típica de uma plataforma com borda.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Allen P.A., Allen J.R. 2013. *Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment*. Wiley, Blackwell, 632 p.

B

Brown L.F. Jr. Fisher W.L. 1977. Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull apart basins. In: Payton C.E. (ed.) *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. Memoir, American Association of Petroleum Geologists*, **26**:213–248.

C

Campos S. 2012. Formação Ponta do Mel – Albiano da Bacia Potiguar: geoquímica na análise da evolução diagenética. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 189 p.

Cazarin C.L., Bagni F.L., Garcia A.A.Z., Pessoa, V.C.O. 2014. Modelo deposicional e diagenético da Fm. Ponta do Mel, Bacia Potiguar – NE Brasil. In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, BA.

Chang H.K., Kowsmann R.O. 1987. Interpretação genética das sequências estratigráficas das bacias da margem continental brasileira. *Rev. Bras. Geociências*, **17**: 74-80.

Chang H.K., Kowsmann R.O., Figueiredo A.M.F., Bender A.A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift System: an overview. *Tectonophysics*, **213**: 97–138.

D

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

264 p.

Dias-Brito D. 1985. Calcisphaerulidea e microfósseis associados da Formação Ponta do Mel – Bacia Potiguar, Brasil. *Coletânea de Trabalhos de Paleontologia*, Brasília, DNPM, 307-314.

Dunham R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham W.E. (ed.) *Classification of Carbonate rocks*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1, p. 108-122.

E

Ellis D.V., Singer J.M. 2008. *Well Logging for Earth Scientists*. Elsevier, vol. 4.

Emery D., Myers K. J. 1996. *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science Uxbridge, Londres, 297 p.

G

Granier B., Dias-Brito D., Bucur II. 2008. Calcareous algae from Upper Albian–Cenomanian strata of the Potiguar Basin (NE Brazil). *Geol Croat.* **61**:311–320.

H

Handford C.R., Loucks R.G. 1993. Carbonate depositional sequences and systems tracts - responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. In: Loucks R.G., Sarg F. (eds). *Carbonate Sequence Stratigraphy – Recent Developments and Applications*. AAPG, Memoir 57, p. 3-41.

Holz M. 2012. *Estratigrafia de Sequências: Histórico, Princípios e Aplicações*. Interciências, 1ª edição, 272 p.

K

Kerans C., Tinker S.W. 1997. *Sequence stratigraphy and characterization of carbonate reservoirs*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Short Course Notes No. 35, 130 p.

L

Luthi S.M. 2001. *Geological Well Logs: Use in Reservoir Modeling*, Springer, 1ª edição.

M

Matos R.M.D. 1987. Sistema de “rifts” cretáceos do Nordeste Brasileiro. *In: Seminário de Tectônica da Petrobras*, 1, Rio de Janeiro, Atas, Petrobras/Depex, p. 126-159.

Mitchum Jr. R.M. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. *In: Payton C.E. (ed.). Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG, Memoir 26, p. 205–212.

Mitchum Jr. R.M. Vail P.R. Thompson S. III. 1977a. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. *In: Payton C.E. (ed.) Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. Memoir, American Association of Petroleum Geologists, **26**:53-62.

Mitchum Jr. R.M. Vail P.R. Sangree J.B. 1977b. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection patterns in Depositional Sequences. *In: Payton C.E. (ed.) Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. Memoir, American Association of Petroleum Geologists, **26**:117-133

N

Nichols G. 2001. *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford, 355 p.

P

Pessoa Neto O.C. 1999. Análise estratigráfica integrada da plataforma mista (siliciclástica-carbonática) do Neógeno da Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 220 p.

Pessoa Neto O.C., Soares U.M., Silva J.G.F., Roesner E.H., Florencio C.P. Souza C.A.V. 2007. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**(2): 357-369.

R

Ribeiro, A.F. 2016. Perfis geofísicos em poços revestidos: aplicações em hidrogeologia, meio ambiente e geotecnia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 90 p.

S

Severiano Ribeiro H.J.P. 2001. *Estratigrafia de Sequências – Fundamentos e Aplicações*. Editora Unisinos, Rio Grande do Sul, 428 p.

Silveira F.C. 2006. Magmatismo cenozóico da porção central do Rio Grande do Norte, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 195 p.

Souza Z.S., Vasconcelos P.M., Nascimento M.A.L., Silveira F.V., Paiva H.S., Silveira Dias L.G., Viegas M.C.D., Galindo A.C., Oliveira M.J.R. 2004. Geocronologia e geoquímica do magmatismo cretácico a terciário do NE do Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 42º, Araxá/MG, Resumos. CD-ROM.

T

Telford V.M, Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.

Terra G.J.S. 1990. Fácies, modelo deposicional e diagênese da sequência carbonática albo-

cenomaniana (Formação Ponta do Mel) da Bacia Potiguar. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 153 p.

Tibana P., Terra G.J.S. 1981. Sequências Carbonáticas do Cretáceo na Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da Petrobrás*, **24**(3): 174-183.

V

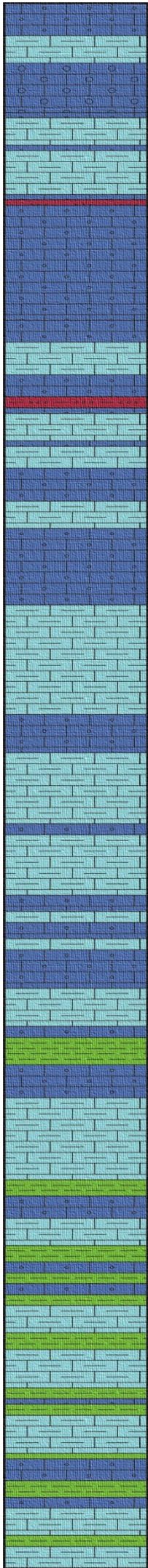
Vail P.R., Mitchum Jr. R.M. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 1: Overview. In: Payton C.E. (ed.). *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. Memoir, American Association of Petroleum Geologists, **26**: 51-52.

Van Wagoner J.C., Posamentier H.W., Mitchum R.M., Vail P.R., Sarg J.F., Loutit T.S., Hardenbol J. 1988. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G.S.C., Posamentier, H.W., Ross C.A., Van Wagoner J.C. (eds). *Sea Level Changes – An Integrated Approach*. SEPM, Special Publications 42, p. 39-45.

Vasconcelos E.P. 1995. O evento CPT (Camadas Ponta do Tubarão), Aptiano da Bacia Potiguar. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 198 p.

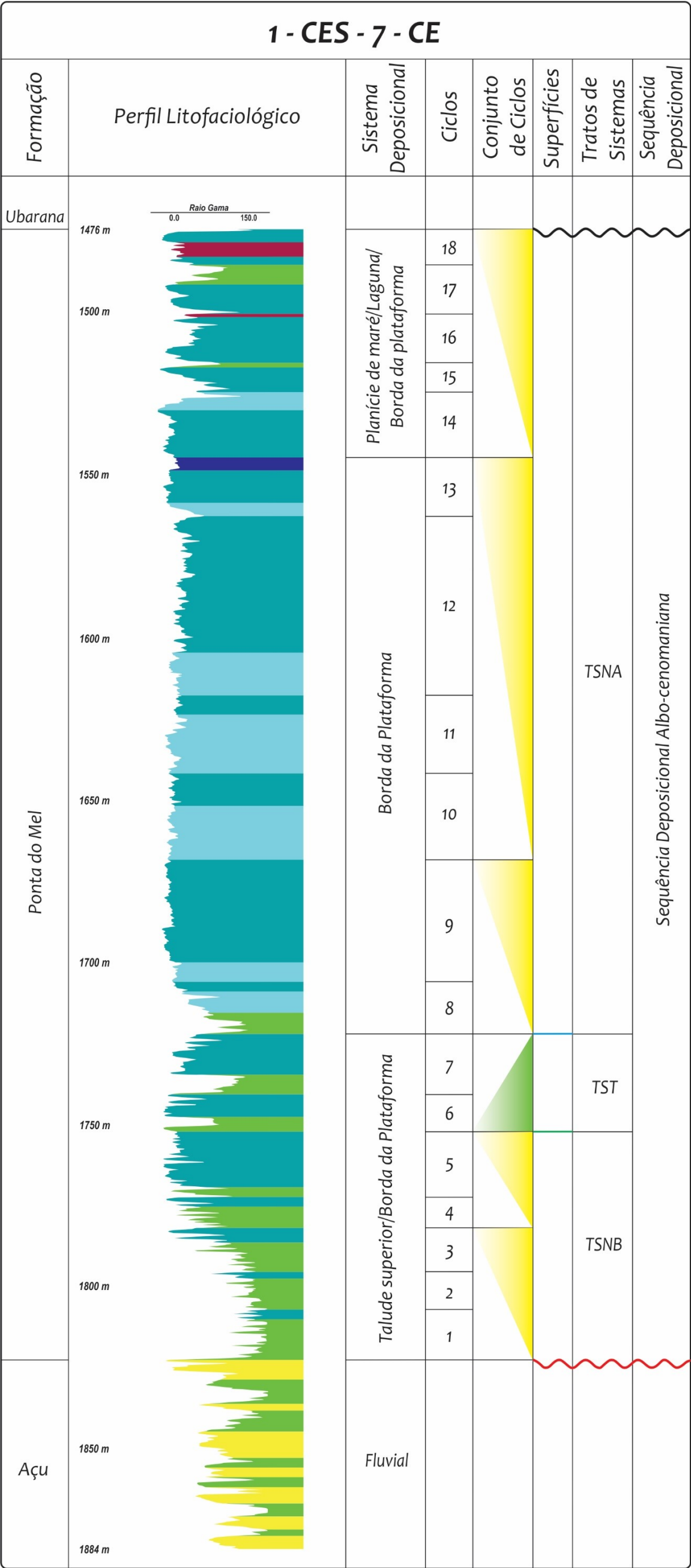
W

Wollenberg H. 1977. Radiometric Methods. In: Morse J.G (ed). *Nuclear Methods in Mineral Exploration and Production*. Amsterdam, Elsevier Science, 5-36.



APÊNDICE A

Diagramas 1D Adicionais ao Artigo Científico



Litofácies

Arenito

Siltito

Folhelho

Calclutito

Calcarenito

Calcirrudito

Superfícies Estratigráficas

Discordância do Campaniano superior

Discordância Pré-Albiano superior

Superfície de Inundação Máxima

Superfície Transgressiva

Limite de Formação

Unidades Estratigráficas

Sequência Depositional

Sequência Depositional Albo-cenomaniana

Conjuntos de Ciclos

Conjunto de ciclos progradacional

Conjunto de ciclos retrogradacional

Tratos de Sistemas

TSNB

Trato de Sistemas de Nível Baixo

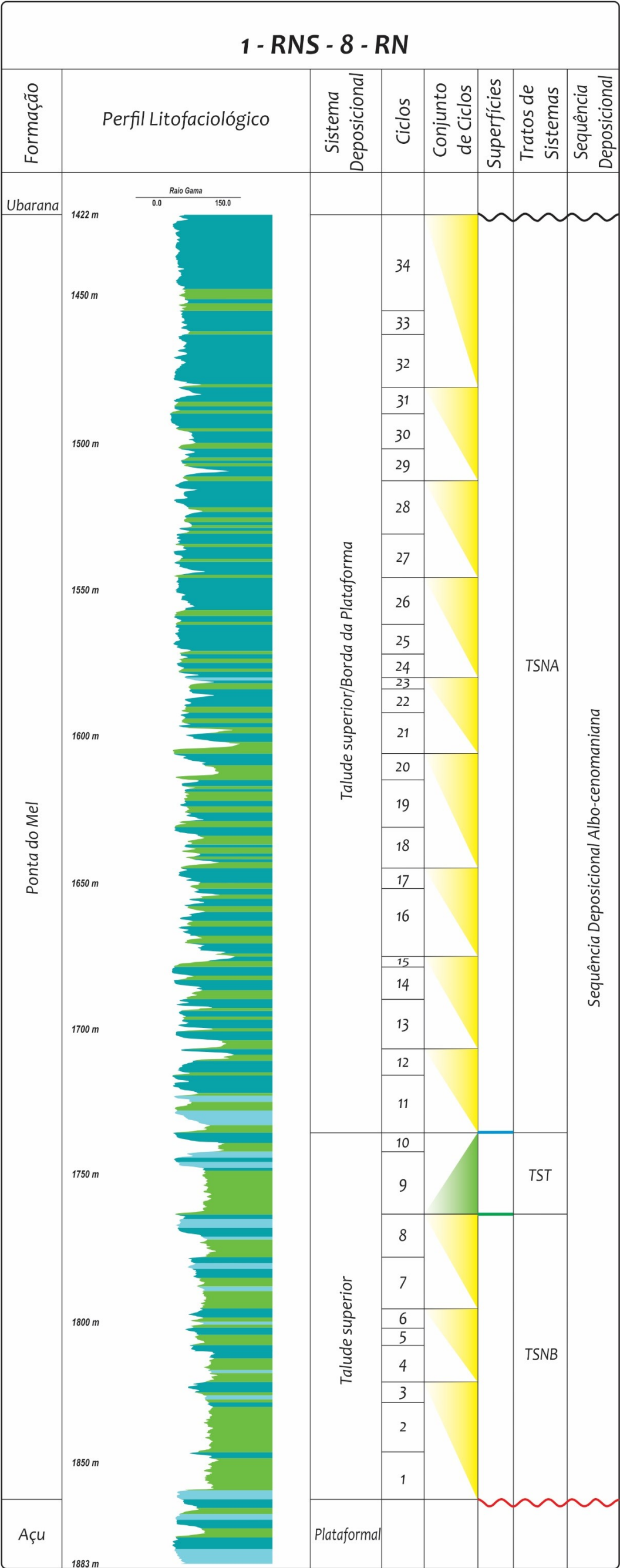
TST

Trato de Sistemas Transgressivo

TSNA

Trato de Sistemas de Nível Alto

AI – Diagrama 1D apresentando o poço 1-CES-7-CE, com seu perfil litofaciológico, além dos sistemas deposicionais, das superfícies estratigráficas, e das unidades da estratigrafia de sequências, reconhecidos para o intervalo estudado.



Litofácies

Folhelho

Calcarenito

Calclutito

Superfícies Estratigráficas

Discordância do Campaniano superior

Discordância Pré-Albiano superior

Superfície de Inundação Máxima

Superfície Transgressiva

Limite de Formação

Unidades Estratigráficas

Sequência Depositional

Sequência Depositional Albo-cenomaniana

Conjuntos de Ciclos

Conjunto de ciclos progradacional

Conjunto de ciclos retrogradacional

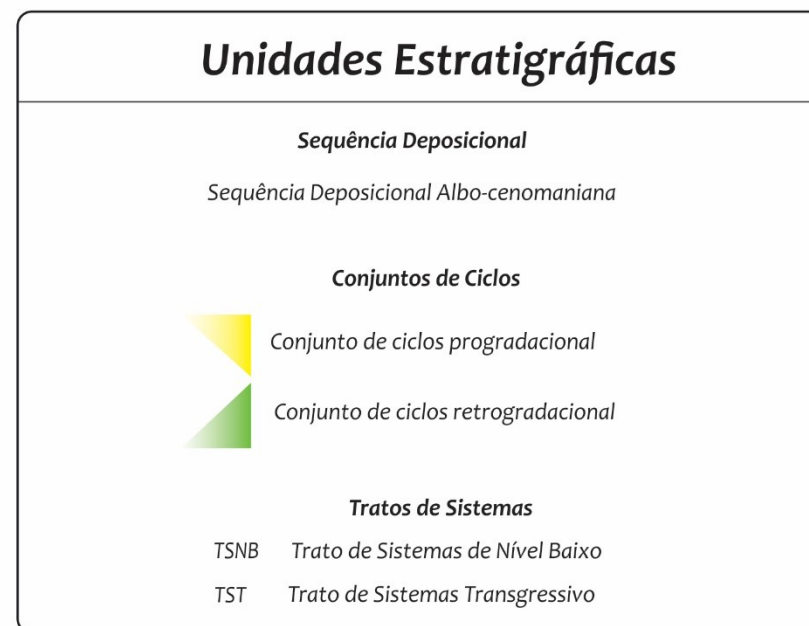
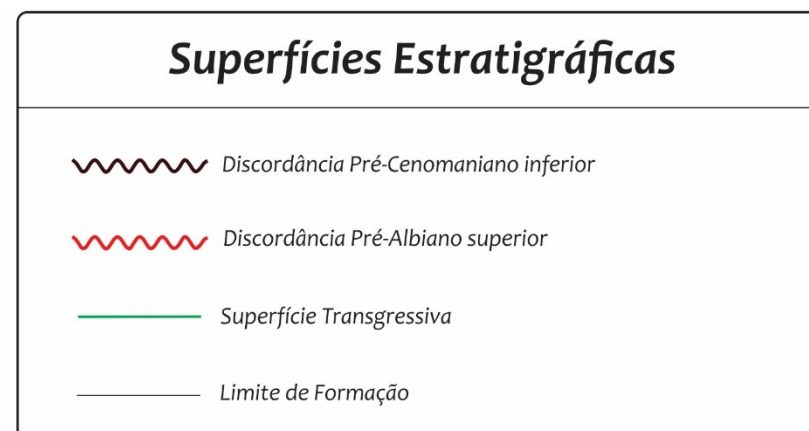
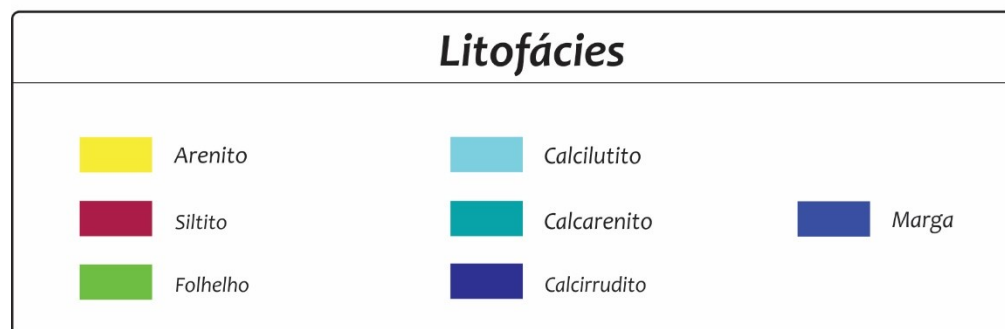
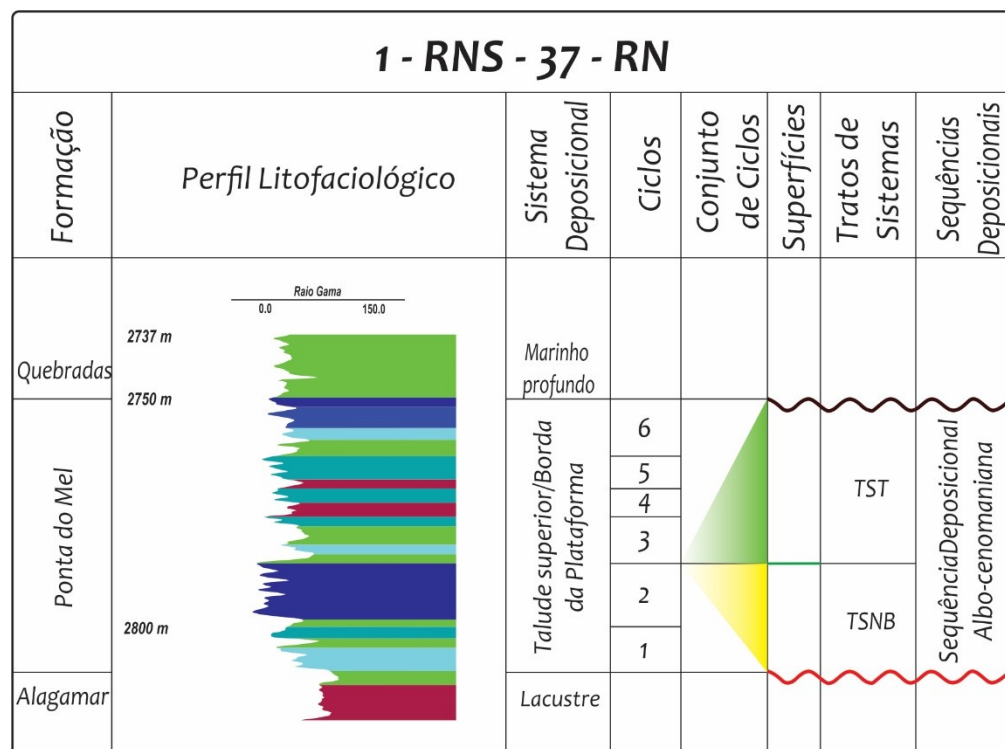
Tratos de Sistemas

TSNB Trato de Sistemas de Nível Baixo

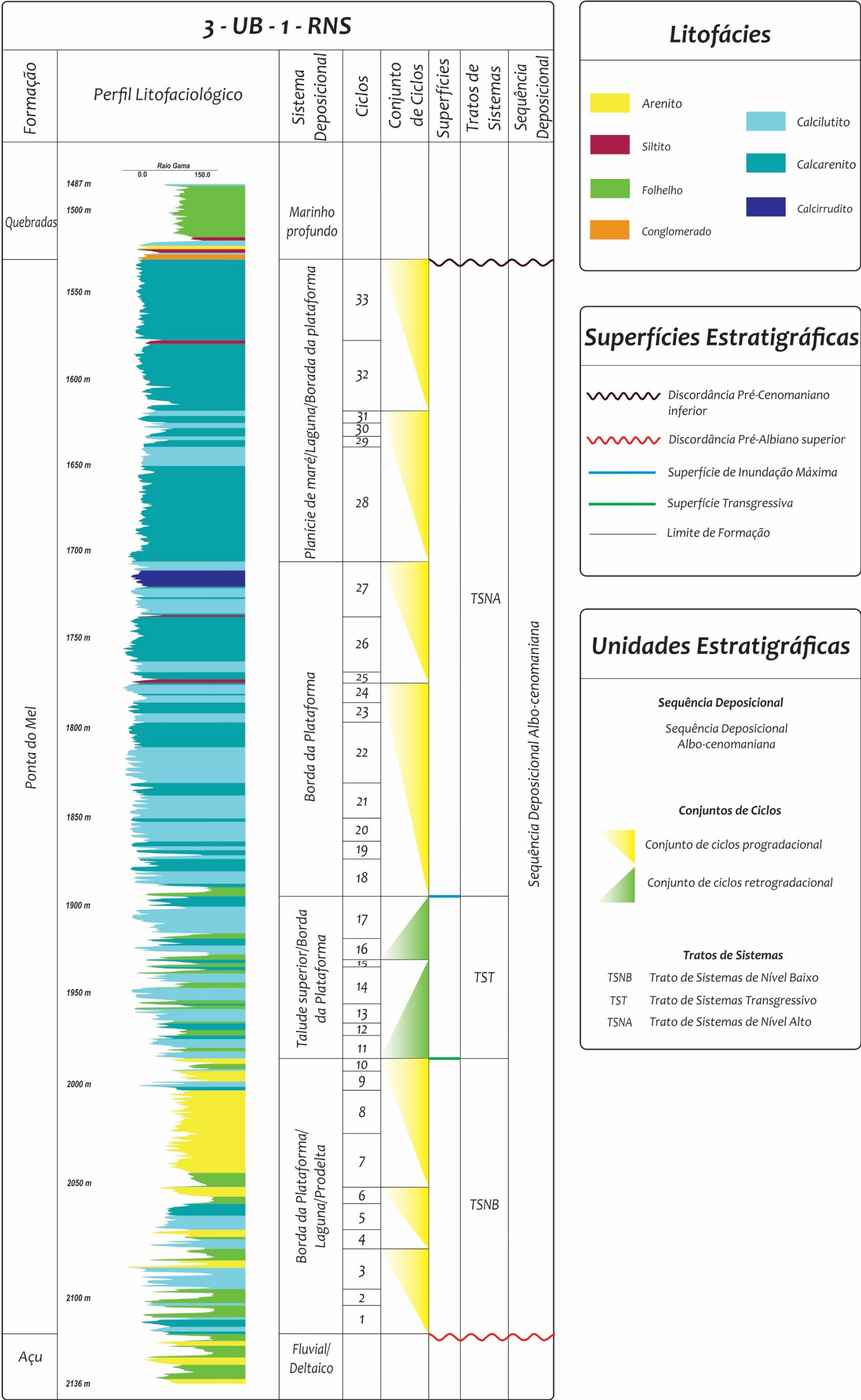
TST Trato de Sistemas Transgressivo

TSNA Trato de Sistemas de Nível Alto

A2 – Diagrama ID para o poço 1-RNS-8-RN, com seu perfil litofaciológico, confeccionado a partir da fusão entre os perfis de raios gama e litológico, além dos sistemas deposicionais, das superfícies estratigráficas, e das unidades da estratigrafia de sequências, reconhecidos para o intervalo estudado.



A3 – Diagrama 1D do poço 1-RNS-37-RN caracterizando o seu perfil litofaciológico e delimitando os sistemas deposicionais, as superfícies estratigráficas, e as unidades da estratigrafia de sequências, reconhecidos para o intervalo estudado.



A4 – Diagrama 1D para o poço 3-UB-1-RNS apresentando o perfil litofaciológico, confeccionado a partir da fusão entre os perfis de raios gama e litológico, além dos sistemas deposicionais, das superfícies estratigráficas, e das unidades da estratigrafia de sequências, reconhecidos para o intervalo estudado.