

**Daniel Dutra de Moraes Fregonese Peregrino**

**AMBIENTE TECTÔNICO E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DA  
FORMAÇÃO CODÓ NAS BACIAS DO PARNAÍBA E SÃO LUÍS**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
(Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022



UFRJ

**Danniel Dutra de Moraes Fregonese Peregrino**

**AMBIENTE TECTÔNICO E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO  
CODÓ NAS BACIAS DO PARNAÍBA E SÃO LUÍS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo.

(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Msc. Leidiane D'Souza

(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Bsc. Marta Soares

(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Rio de Janeiro

Abril de 2022

DANNIEL, Dutra de Moraes Fregonese Peregrino

**Ambiente Tectônico e Evolução Estratigráfica da  
Formação Codó nas Bacias do Parnaíba e São Luís /**

Daniel Dutra de Moraes Fregonese Peregrino - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2022.

xx, 000 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2022.

Orientadores: Prof. Dr. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo, MSc. Leidiane D'Souza, BSc. Marta Teixeira.

1. Geologia. 2. Estratigrafia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Ambiente Tectônico e Evolução Estratigráfica da Formação Codó nas Bacias do Parnaíba e São Luís.

Danniel Dutra de Moraes Fregonese Peregrino

AMBIENTE TECTÔNICO E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO  
CODÓ NAS BACIAS DO PARNAÍBA E SÃO LUÍS

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Graduação em Geologia do Instituto de  
Geociências, Universidade Federal do Rio  
de Janeiro – UFRJ, apresentado como  
requisito necessário para obtenção do grau  
de Geólogo.

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge de Jesus Picanço de  
Figueiredo.

(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Msc. Leidiane D'Souza

(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Bsc. Marta Soares

(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Aprovada em: 01.04.2022

Por:

---

Orientador: Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo (IGEO/UFRJ)

---

Aristóteles Rios Neto (IGEO/UFRJ)

---

Marcelo da Silva Mendes (Msc.)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022

Dedico esse trabalho à minha mãe que tanto batalhou pela minha educação.

## Agradecimentos

À minha família, em especial minha mãe Lucia, por todo o carinho, apoio, esforço e valores ensinados, que foram a base para a minha formação como cidadão, e a minha irmã Marianna, por todo o apoio e convivência familiar durante o nosso crescimento;

Aos meu orientadores Prof. Dr. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo, Marta Soares e Leidiane D'Souza, por toda a orientação durante esse processo. A dedicação e paciência durante nossa convivência e os ensinamentos passados por vocês foram essenciais para a minha formação. Também a minha companheira de grupo na iniciação científica Amanda Mustafa, onde compartilhamos desses ensinamentos e o apoio durante o projeto.

Aos meus amigos Leo, Gabi, Vinicius, Will, Maria, Pikachu, Hamanda, Gerson, Paloma e Elaine, que fiz durante a graduação. A companhia e as experiências compartilhadas com vocês tornou esse ciclo o melhor possível. Levarei vocês pra minha vida toda.

Aos meus amigos de infância, a amizade de vocês durante todos esses anos me ajudou a chegar onde cheguei;

À Shell Brasil LTDA., pelo financiamento do Projeto Alagoas, do qual pude fazer parte como aluno de iniciação científica;

À Agencia Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), por disponibilizar os dados de poços necessários para este trabalho;

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, instituição a qual tive o privilégio de estudar e ao povo brasileiro por manter, com os árduos impostos que recaem sobre seus parques salários, um sistema educacional público, gratuito e de alto nível. Sem isso, jovens, como eu, sem recursos para pagar pelo ensino superior não chegariam onde cheguei;

Agradeço também a todos os outros não citados nesse espaço, que tenham contriuiuído mesmo que indiretamente para a conclusão deste trabalho, meu muito obrigado a todos.



## Resumo

PEREGRINO, Dannel. **Ambiente Tectônico e Evolução Estratigráfica da Formação Codó nas Bacias do Parnaíba e São Luís**. 2022. xx, 000 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A Formação Codó de ocorrência na porção centro-norte da Bacia do Parnaíba e Bacia do São Luís, estado do Maranhão, Brasil, foi depositada durante o andar Alagoas, Eocretáceo, em uma bacia de ambiente tectônico do tipo sag com dezenas de quilômetros quadrados de área e apenas dezenas de metros de profundidade. O ambiente tectônico de deposição da Formação Codó foi interpretado através da análise do comportamento dos estratos deposicionais desta formação em dados distribuídos regionalmente através de sua atual área de ocorrência, portanto, apropriado para uma análise de cunho regional como a procedida neste trabalho. O desenvolvimento estratigráfico da Formação Codó deu-se através de 3 (três) sequências deposicionais decorrentes de 3 (três) ciclos completos de variação do nível de base. A interpretação do desenvolvimento estratigráfico da Formação Codó foi feita com base nos princípios da Estratigrafia de Sequências através da técnica de análise de identificação de ciclos transgressivos e regressivos representativos de cada um dos tratos de sistemas das sequências deposicionais identificadas. De acordo com esta técnica de análise, ciclos transgressivos condicionam o empilhamento vertical de litofácies com padrão de granodecrescência e adelgaçamentos dos estratos para o topo. Os ciclos regressivos, por sua vez, condicionam o padrão inverso. A interpretação do empilhamento das litofácies foi executada através da análise do comportamento das curvas dos perfis de raios gama de poços perfurados pela indústria petrolífera, conhecida como análise de eletrofácies. Os ciclos transgressivos, ou tratos transgressivos representam um afogamento generalizado da bacia e a deposição predominante de rochas argilosas. Os 2 (dois) ciclos transgressivos basais possuem rochas argilosas cuja os altos valores de raios gama sugerem alto índice de matéria orgânica. Os ciclos regressivos, ou tratos de sistemas regressivos, sugerem uma tendência geral de umidificação para o topo da Formação Codó uma vez que o final do ciclo regressivo basal foi dominado pela deposição de evaporitos, predominantemente anidritas, enquanto que no ciclo intermediário a presença de evaporitos é muito localizada e no ciclo final, que marca o topo da Formação Codó, não foi identificada a presença de evaporitos.

Palavras-chave: Formação Codó, Ciclos T-R, Eletrofácies, Bacia do Parnaíba, Bacia de São Luís, Andar Alagoas

## Abstract

Peregrino, Danniell. **Tectonic environment and stratigraphic evolution of the Codó Formation in the Parnaíba and São Luís basins**. 2022. xx, 000 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Codó Formation, occurring in the north-central portion of the Parnaíba Basin and São Luís Basin, state of Maranhão, Brazil, was deposited during the Alagoas age, Early Cretaceous, in a SAG type sedimentary basin with tens of square kilometers of area and only tens of meters deep. The Codó Formation's depositional tectonic environment was interpreted based on the analysis of its strata behavior. This analysis was carried out on the dataset that is regionally distributed through the current Codó Formation's occurrence area, therefore, suitable for a regional analysis as the one proceeded in this work. The stratigraphic development of the Codó Formation evolved through 3 (three) depositional sequences resulting from 3 (three) complete cycles of base level variation. The interpretation of the stratigraphic development of the Codó Formation was based on the principles of Sequence Stratigraphy through the analysis technique of identifying transgressive and regressive cycles representative of each of the systems tracts of the identified depositional sequences. According to this analysis technique, transgressive cycles condition the vertical stacking of lithofacies with a fining and thinning upward pattern. The regressive cycles, in turn, condition the reverse pattern. The interpretation of the lithofacies stacking was performed through the analysis of the behavior of the gamma ray logs of wells drilled by the oil industry, known as electrofacies analysis. The transgressive cycles, or transgressive tracts, represent a generalized drowning of the basin and the predominant deposition of shaly rocks. The 2 (two) basal transgressive cycles have shaly rocks whose high values of gamma rays suggest a high level of organic matter. The regressive cycles, or regressive system tracts, suggest a general trend of humidification towards the top of the Codó Formation, since the end of the basal regressive cycle was dominated by the deposition of evaporites, predominantly anhydrites, while in the intermediate cycle the presence of evaporites is very localized and in the final cycle, which marks the top of the Codó Formation, the presence of evaporites was not identified.

**Key-Words:** Codó Formation, T-R Cycles, Electrofacies, Parnaíba Basin, São Luís Basin, Alagoas age

## Lista de Figuras

- Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo baseado no mapa geológico da Bacia do Parnaíba (CPRM). O código de cor das unidades litológicas mostra que toda a área de estudo se encontra na Sequência Cretácea. Os poços analisados estão plotados nos mapas e dispostos em duas transects de orientação NW-SE e SW-NE. Todas as outras informações relevantes encontram-se na figura ..... 23
- Figura 2 – Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba de Góes & Feijó (1994) adotada neste trabalho ..... 28
- Figura 3 – Síntese do posicionamento das formações Cretáceas nas bacias do Parnaíba e São Luís modificada de Ferreira et al. (2021). Retângulo tracejado vermelho foi adicionado para mostrar que em todos os trabalhos a Fm. Codó encontra-se total, ou parcialmente posicionada no neoptiano. Iniciais: MA e PB, Bacia do Maranhão ou Bacia do Parnaíba. SL, Bacia de São Luís. IN, Grabem de Ilha Nova. BV, Bacia Bragança-Viseu ..... 32
- Figura 4 – Carta estratigráfica da bacia de São Luís proposta por Zalán (2007) ..... 34
- Figura 5 – Carta estratigráfica unificada para o norte da bacia do Parnaíba e para a bacia de São Luís proposta por D’Souza (2020) ..... 36
- Figura 6 – Quadro com os perfis geofísicos mais comuns e os tipos de informações que fornecem tanto a partir da avaliação quantitativa (Análise Petrofísica), quanto a partir da avaliação qualitativa (Interpretação Geológica de Perfis). Modificado de Rider (2002) ..... 38
- Figura 7 – Seção sedimentar idealizada com diferentes litologias (identificadas na figura) empilhas e a resposta aproximada do perfil de GR Total (esquerda) e Espectral (direita). Modificado de Rider 2002) ..... 43
- Figura 8 – Padrões de perfis de GR com resposta à variação da variação vertical de litofácies. Todas as informações relevantes estão na figura. Modificado de Holz (2012) ..... 46
- Figura 9 – Padrões de perfis de GR com resposta à variação da variação vertical de litofácies. Todas as informações relevantes estão na figura. Fonte: Bianchini, 2018 após modificação de Rider (2002) ..... 47
- Figura 10 – Figura esquemática mostrando a interpretação de paleobatimetria, ambientes deposicionais e sequências deposicionais a partir da análise de eletrofácies. Modificado de Rider (2002) ..... 49
- Figura 11 - Diferentes proposições por diferentes autores para a análise da Estratigrafia de Sequências mostrados por Catuneanu (2017) ..... 54
- Figura 12- Nomenclatura para as diferentes proposições para a análise da Estratigrafia de Sequências como mostrados por Catuneanu (2017). CC\*: Conformidades correlative. FR: Regressão Forçada. FSST: Trato de Sistema de Queda do Nível de Base. HNR: Regressão Normal do Trato de Mar Alto. HST: Trato de Mar Alto. LNR: Regressão Normal do Trato de Mar Baixo. LST: Trato de Sistemas de Mar Baixo. MFS: Superfícies de Inundação Máxima.

MRS: Superfície de Regressão Máxima. R: Regressão. RSL: Nível Relativo do Mar. RST: Trato de Sistemas Regressivo. T: Transgressão. T-R: Transgressão-Regressão. TST: Trato de Sistemas Transgressivo. Os limites de Sequências são assinalados pelas linhas vermelhas. Curva (senoide) de variação do nível de base com todas as informações relevantes ..... 55

Figura 13- Curva senoidal que representa idealmente a variação do Nível de Base em uma bacia sedimentar. Todas as informações relevantes estão contidas na figura. Modificada de Catuneanu (2006 e 2017) ..... 57

Figura 14: Fluxograma de trabalho ..... 60

Figura 15- Colunas litológicas e curvas de GR dos poços COROATÁ e ANP-5. Os dois poços estão distantes 275 km em linha reta. Em destaque a Formação Codó nos dois poços com base e topo marcados a partir do poço COROATÁ e com padrões de eletrofácies internas. No poço ANP-5 observa-se o padrão muito distinto das eletrofácies das Fms Codó e Itapecuru ..... 67

Figura 16 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço COROATÁ ..... 70

Figura 17 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-ANP-5-MA ..... 71

Figura 18 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-PR-1-MA ..... 71

Figura 19 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-RPR-1-MA ..... 72

Figura 20 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-IV-1-MA ..... 72

Figura 21 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-CI-1-MA ..... 73

Figura 22 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 9-PAF-3-MA ..... 73

Figura 23 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-107-MA / TRIZIDELA ..... 74

Figura 24 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-59-MA ..... 75

Figura 25 – Seção sísmica 303-017 sobre a qual dada a localização 1-OGX-59-MA. A) Seção sísmica inteira com o poço posicionado e o horizonte da anidrita Codó interpretado em amarelo. O mapa de localização mostra além da seção e do poço em questão (vermelho), os outros poços que compõem a transect NW-SE apresentada neste trabalho. B) Detalhe da seção sísmica sem interpretação. C) Detalhe da seção sísmica com interpretação. Demais informações relevantes estão contidas na figura ..... 77

Figura 26 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-AT-1-MA .....	79
Figura 27 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 3-OGX-38-MA .....	80
Figura 28 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-101-MA .....	81
Figura 29 – Transect 1. Faixas verdes representa as seções sedimentares dos ciclos transgressivos. Faixas amarelas representam as seções sedimentares dos ciclos regressivos, incluindo os canais interpretados. A) Poços em distância real. B) Poços equidistantes para uma melhor visualização <b>IMPORTANTE: FAIXAS VERDES E LARANJAS NÃO REPRESENTAM LOTOLOGIAS</b> .....	82
Figura 30 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-BAC-1MA .....	83
Figura 31 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-102-MA .....	83
Figura 32: Transect 2. Faixas verdes representa as seções sedimentares dos ciclos transgressivos. Faixas amarelas representam as seções sedimentares dos ciclos regressivos, incluindo os canais interpretados. <b>IMPORTANTE: FAIXAS VERDES E LARANJAS NÃO REPRESENTAM LOTOLOGIAS</b> .....	84
Figura 33 – Bloco diagrama esquemático usado neste trabalho como análogo para representar sistemas deposicionais fluviais que podem ter evoluído para sistema fluvio-eólicos conectando os sistemas fluviais individuais e formando lençóis de areia durante os ciclos regressivos (regressões forçadas) da Fm. Codó em uma bacia do tipo sag, vasta, mas, rasa. Todas as informações relevantes no corpo da figura .....	91
Figura 34 – Bloco diagrama modificado de Coe et al. (2003). Informações relevantes no corpo da figura .....	92

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Tabela com Topos da Formação Codó .....	66
---	----

## Sumário

Agradecimentos .....	vi
Resumo .....	viii
<i>Abstract</i> .....	ix
Lista de figuras .....	x
Lista de tabelas .....	xiii
1 INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Objetivo Geral e Finalidade .....	19
1.2 Objetivos específicos .....	19
1.3 Questões que se pretende responder com este trabalho .....	20
2 GEOLOGIA REGIONAL .....	21
2.1 Generalidades da Área de Estudo .....	21
2.2 Tectônica da Bacia do Parnaíba .....	23
2.3 Estratigrafia da Bacia do Parnaíba .....	26
2.3.1 Detalhamento das Sequências Depositionais na Bacia do Parnaíba .....	29
2.4 Vulcanismo na Bacia do Parnaíba .....	32
2.5 Tectônica da Bacia de São Luís .....	33
2.6 Estratigrafia da Bacia de São Luís .....	34
2.7 Nova Carta Estratigráfica para as Bacias do Parnaíba e São Luís .....	36
3 REFERENCIAIS TEÓRICOS .....	37
3.1 Perfis Geofísicos .....	37
3.1.1 Princípios dos Perfis de Raios Gama .....	38
3.1.2 Ocorrência de Urânio, Potássio e Tório .....	40
3.1.3 Interpretação Geológica de Perfis de Raios Gama .....	44
3.1.4 Eletrofácies e Eletrosequências .....	46
3.2 Estratigrafia de Sequências .....	50
3.2.1 Sequências T-R .....	56
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	60
4.1 Materiais .....	60
4.2 Métodos (Fluxo de Trabalho) .....	60
4.2.1 Seleção de Poços .....	60

4.2.2 Controle de Qualidade .....	61
4.2.3 Definição de Base e Topo do Objeto de Análise (Formação Codó) .....	62
4.2.4 Identificação de Eletrofácies e Eletrossequências .....	63
5 RESULTADOS .....	65
5.1 Tabela de Redefinição de Topos e Bases da Formação Codó nos Poços Analisados .....	66
5.2 Definição do Padrão Geral de Eletrofácies das Formações Codó e Itapecuru .....	66
5.3 Definição do Padrão de Eletrofácies Internas da Formação Codó em todos os Poços Analisados neste Trabalho .....	69
5.3.1 Poço 1-OGX-96-MA / COROATÁ .....	69
5.3.2 Seção 1 (NW-SE) .....	71
5.3.2.1 Poço 2-ANP-5-MA .....	71
5.3.2.2 Poço 2-PR-1-MA .....	72
5.3.2.3 Poço 1-RPR-1-MA .....	72
5.3.2.4 Poço 1-IV-1-MA .....	73
5.3.2.5 Poço 1-CI-1-MA .....	73
5.3.2.6 Poço 9-PAF-3-MA .....	74
5.3.2.7 Poço 1-OGX-107-MA / TRIZIDELA .....	74
5.3.2.8 Poço 1-OGX-59-MA .....	75
5.3.2.9 Poço 1-AT-1-MA .....	78
5.3.2.10 Poço 3-OGX-38-MA .....	79
5.3.2.11 Poço 1-OGX-101-MA .....	80
5.3.2.11 TRANSECT 1 (NW-SE) .....	82
5.3.3 INTERPRETAÇÃO DOS CICLOS T-R NOS POÇOS DA TRANSSECT 2 (SW-NE).....	83
5.3.3.1 Poço 2-BAC-1-MA .....	83
5.3.3.2 Poço 1-OGX-102-MA .....	83
5.3.3.3- TRANSECT 2 (SW-NE) .....	84
6 DISCUSSÕES .....	85
6.1 Ambiente Tectônico de Deposição da Formação Codó na área de estudo .....	86
6.2 Desenvolvimento da Dinâmica do Empilhamento Estratigráfico da Formação Codó na porção norte da Bacia do Parnaíba e na Bacia de São Luís .....	87

6.3 Sistemas Depositionais Relacionados aos Ciclos Transgressivos e Regressivos das 3 (três) Sequências Depositionais Interpretadas .....	90
7 CONCLUSÕES.....	93
Referências bibliográficas .....	95

## 1-INTRODUÇÃO

A área deste estudo envolve as porções centro-norte da Bacia do Parnaíba e a Bacia de São Luís, localizadas na região nordeste do país, mais precisamente no estado do Maranhão, que durante o Mesozoico foi afetada por eventos tectônicos de grande escala que atingiram o paleocontinente Pangea, sendo a mais notória a ruptura continental (*breakup*) que deu origem aos atuais continentes América do Sul e África no Eocretáceo. Porém, outros eventos de escala continental como o vulcanismo relacionado à *Central Atlantic Magmatic Province* (CAMP), uma das maiores províncias ígneas do Fanerozoico, atingiram a área de estudo ainda no Mesozoico (Neotriássico-Eojurássico). Este evento antecedeu o rifteamento do Eocretáceo e causou uma profunda reconfiguração tectônica e estratigráfica da antiga Bacia do Parnaíba que já vinha se desenvolvendo através de vários pulsos intercalados de subsidência e soerguimento desde o Siluriano.

No contexto litoestratigráfico da Bacia do Parnaíba o intervalo deste estudo é a Formação Codó, depositada durante a Idade Alagoas (+/- Aptiano). Há décadas as várias interpretações apresentadas na literatura geocientífica para a evolução tectônica e estratigráfica da Fm. Codó tem provocado um acalorado debate posto que algumas são, por vezes, díspares e antagônicas. Por exemplo, o ambiente tectônico que deu origem à bacia que recebeu e preservou os depósitos da Fm. Codó são interpretados por alguns autores como uma bacia do tipo *sag* cuja subsidência atinge uma vasta área, mas, é de baixa intensidade. Outros autores, no entanto, pensam diametralmente oposto, ou seja, sugerem que a Fm. Codó foi depositada em um ambiente tectônico de rifte onde a subsidência atinge uma área pequena, mas, é de alta intensidade.

Também há polêmica no tange à evolução estratigráfica da Fm. Codó. Vários trabalhos têm sido feitos utilizando-se diferentes métodos de análises, como por exemplo

bioestratigrafia, quimioestratigrafia, análise faciológica para interpretação de sistemas deposicionais e proposição de arcabouço estratigráfico, etc. Estes trabalhos têm produzindo diferentes resultados, os quais, também nestes casos, mostram disparidades entre si. Uma das características destes trabalhos é que apesar de serem executados em nível de detalhe, são sempre executados com um montante limitado e localizado de dados, porém têm seus resultados sempre extrapolados para toda a bacia. Esta talvez seja uma das causas das disparidades entre os resultados de trabalhos que analisam dados em áreas específicas e pequenas de uma bacia muito grande.

Tendo em vista estas questões, a análise apresentada neste Trabalho de Conclusão de Curso optou por usar uma gama de dados distribuídos regionalmente que pudessem ser representativos de toda a bacia. Esta opção, todavia, levou a se busca de um método de análise que fosse plausível de ser executado com os dados disponíveis. Desta forma, optou-se por usar dados de poços perfurados pela indústria petrolífera os quais tem distribuição bastante disseminada pela área da bacia, apesar de não terem uma situação ideal (esta é impossível), posto que os poços não são distribuídos equidistantemente pela bacia, mas, é o banco de dados mais regional que se tem.

Assim sendo, decidiu-se pelo método de análise que interpreta a variação vertical de litofácies pelo padrão das curvas dos perfis de raios gama corridos nos poços. Os padrões de perfis são chamados de eletrofácies. Este tipo de análise é de uso consagrado para se interpretar a evolução estratigráfica de sucessões deposicionais em subsuperfície, daí porque ele é muito usado, ainda que pragmaticamente, na indústria que explora hidrocarbonetos em bacias sedimentares. Todavia, este método de análise ganhou nas últimas décadas referendo científico da Academia através de uma vasta gama de publicações geocientíficas. Mais ainda, o método de eletrofácies tem sido usado na interpretação da evolução da Estratigrafia de

Sequências quando se faz esta abordagem através da análise de ciclos Transgressivos e Regressivos (Ciclos T-R) como resultados da variação do nível de base de uma bacia.

Desta forma, este trabalho, mesmo considerando todas as contribuições anteriores para a análise da evolução tectônica e estratigráfica da Fm. Codó, propõe a apresentação de uma interpretação inédita, uma vez que é o primeiro trabalho a usar um banco de dados de abrangência regional para a área de ocorrência da Fm. Codó nas bacias do Parnaíba e de São Luís e, além disso, é o primeiro trabalho que se baseará em um método cientificamente consagrado de análise da Estratigrafia de Sequências para se entender a evolução e a distribuição dos depósitos sedimentares em uma bacia como decorrência da variação de seu nível de base. Esta abordagem da evolução estratigráfica também permite se fazer inferências sobre os tipos de sistemas deposicionais que ocorrem em cada um dos dois tratos de sistemas (transgressivo e regressivo) que compõem a sequência deposicional.

### **1.1 – Objetivo Geral e Finalidade**

Esse trabalho objetiva a proposição de um modelo para a evolução tectono-estratigráfica da Fm. Codó nas bacias do Parnaíba e São Luís baseado no método de análise da Estratigrafia de Sequências que se fundamenta na interpretação de ciclos transgressivos e regressivos resultantes da variação do nível de base da bacia. A finalidade da proposição deste modelo é contribuir para o entendimento da questão visto que não existe um consenso a respeito do assunto no meio acadêmico, tampouco no ambiente industrial relacionado à exploração petrolífera.

### **1.2 – Objetivos específicos**

- Interpretação dos padrões de eletrofácies no poço modelo (2-CO-1-MA).

- Interpretação dos padrões de eletrofácies em todos os outros poços analisados neste trabalho com base na interpretação do poço modelo.
- Interpretação dos ciclos transgressivos e regressivos em todos os poços analisados.
- Montagem de seções estratigráficas regionais (transects)

### **1.3 – Questões que se pretende responder com este trabalho**

- Em que ambiente tectônico foi depositada a Fm. Codó na área de estudo?
- Como se deu a evolução estratigráfica da Fm. Codó?
  - É possível fazer inferências sobre os tipos de sistemas deposicionais mais frequentes na Fm. Codó a partir da interpretação da Estratigrafia de Sequências?
- O método de análise da Estratigrafia de Sequência pode ser usado no ambiente deposicional tal qual o da Fm. Codó, ou seja, uma bacia sedimentar de interior de continente?

## 2- GEOLOGIA REGIONAL

### 2.1- Generalidades da Área de Estudo

A área de estudo situa-se na porção centro-norte da Bacia do Parnaíba e a Bacia de São Luís, localizadas na região nordeste do Brasil. A Bacia do Parnaíba, abrange praticamente a totalidade dos estados do Maranhão e do Piauí, mas também inclui áreas menores dos estados do Tocantins, Pará, Ceará e Bahia.

Segundo Vaz *et al.* (2007) e Góes & Feijó (1994) e vários outros autores citados por estes, a Bacia do Parnaíba é uma bacia do tipo sinéclise intracratônica ou intracontinental que se desenvolveu no interior dos supercontinentes Gondwana e posteriormente Pangea como decorrência de 5 (cinco) eventos de subsidências seguidos de soerguimentos que expuseram toda a bacia. Segundo os autores supracitados, cada um destes eventos deixou registros sedimentares que são classificados como uma “Sequência Depositional” seguindo os conceitos propostos por Sloss (1963). Estas sequências deposicionais nas bacias intracratônicas/intracontinentais no mundo inteiro são conhecidas como “Sequências de Sloss”, as quais têm duração de dezenas de milhões de anos.

Os limites geológicos da Parnaíba são dados por: (1) ao norte, Arco Ferrer-Urbano Santos; (2) ao noroeste, Arco Tocantins; (3) à oeste, lineamento Tocantins –Araguaia; (4) ao leste, Província do Borborema e; (5) ao Suldeste/Sul, Arco São Francisco (Barbosa *et al.*, 1973). A bacia do Parnaíba tem área de cerca de 600.000 km<sup>2</sup> e espessura vulcano-sedimentar na sua porção mais espessa de cerca de 3.500 m. A área de ocorrência dos depósitos cretáceos (predominantemente Formação Codó) na Bacia do Parnaíba é em torno de 20% do total da área da bacia, ou seja, cerca de 120.000 km<sup>2</sup> (cálculo aproximado feito a partir do mapa geológico da CPRM e das distâncias entre os poços analisados neste trabalho). Através de correlação com litotipos das faixas de dobramentos, maciços e outras entidades complexas,

segundo Vaz et al. (2007), a Bacia do Parnaíba teve seu desenvolvimento inicial sobre um substrato composto por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares no início do Paleozoico, oriundas de processos tectonomagmáticos relacionados ao evento orogenético Brasiliano-PanAfricano que aconteceu do final do Neoproterozoico ao início do Paleozoico.

A Bacia de São Luís ocupa uma área de aproximadamente 20.000 km<sup>2</sup> na região noroeste do estado do Maranhão. A bacia se localiza na porção central do Sistema de Grábens do Gurupi, definido por Azevedo (1991), sendo limitada a sul pelo Arco Ferrer-Urbano Santos e a norte pela Plataforma de Ilha de Santana, e está geneticamente ligada ao processo de rifteamento que culminou com a separação dos hoje continentes africano e sulamericano (Soares *et al.* 2009; Zalán, 2007) (Figura 1).

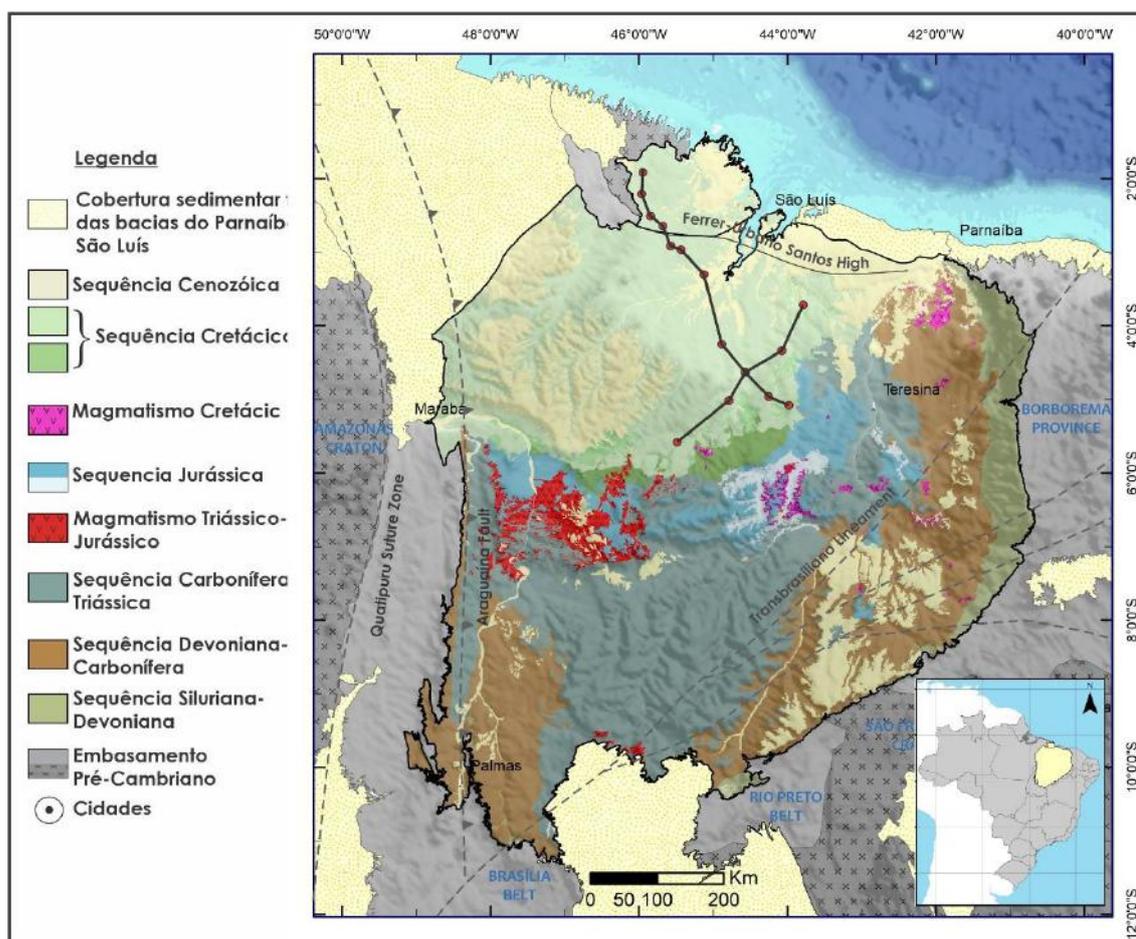


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo baseado no mapa geológico da Bacia do Parnaíba (CPRM). O código de cor das unidades litológicas mostra que toda a área de estudo se encontra na Sequência Cretácea. Os poços analisados estão plotados nos mapas e dispostos em duas transects de orientação NW-SE e SW-NE. Todas as outras informações relevantes encontram-se na figura.

## 2.2- Tectônica da Bacia do Parnaíba

A fase inicial de desenvolvimento da Bacia do Parnaíba segundo Vaz *et al.* (2007) é relacionada às deformações e eventos térmicos do final do Ciclo Brasileiro ou ao Estágio de Transição da Plataforma Sul-Americana como definido por Almeida (1967 e 1969), quando ocorreu uma mudança no regime compressivo para um regime distensivo na Plataforma Sulamericana, e consequentemente abatimento de orógenos. O embasamento sobre o qual a bacia se instalou é de idade proterozoica, onde as feições tectônicas mais notáveis encontradas são os lineamentos Picos-Santa Inês, Marajó-Parnaíba e a Zona de Cizalhamento Transbrasiliana, todas heranças do Ciclo Orogenético Brasileiro-PanAfricano, feições essas que tiveram a importância de controlarem as direções e ao eixo deposicionais da bacia, não só na fase inicial, como durante sua evolução até o Eocarbonífero (Vaz *et al.*, 2007).

No transcorrer de sua história tectono-estratigráfica a Bacia do Parnaíba passou por 5 (cinco) eventos de subsidência regional que capturaram as 5 (cinco) sequências de Sloss que a compõe. Cada uma destas sequências deposicionais é limitada em seu topo por discordâncias regionais que são mapeáveis por toda a bacia evidenciando que a mesma sofreu exumação completa em determinados momentos de sua história, situação semelhante ao que ocorre no presente. Eventos dessa magnitude ocorrem em escala de placa tectônica e normalmente estão relacionados a algum evento orogenético ocorrido na bacia ou em sua vizinhança. De fato, tanto Góes & Feijó (1994), quanto Vaz *et al.* (2007) em seus trabalhos de síntese sobre o estado da arte do conhecimento sobre a geologia da Bacia do Parnaíba reportam que os eventos de exumação da bacia do Parnaíba durante o Paleozoico estão relacionados às principais orogenias que aconteceram nesta era, quais sejam Caledoniana, no início do Devoniano e Herciniana/Allegheniana, do Mesocarbonífero ao Permiano.

Caputo (1984) propõe que os eventos de afogamento dos continentes que colocaram as bacias, regiões naturalmente rebaixadas dos continentes quando comparadas com as regiões cratônicas ou orogênicas, abaixo do nível de base, portanto factíveis de receberem sedimentação, foram decorrentes de períodos de *Greenhouse* (quando não existem calotas polares e portanto o nível eustático dos oceanos está em seu máximo provocando transgressões marinhas sobre os continentes) durante o Paleozoico. Já os períodos de *Icehouse* (quando existem calotas polares e portanto o nível eustático dos oceanos está em seu mínimo provocando regressões e conseqüentemente a exposição do registro sedimentar previamente depositado), segundo Caputo (op. cit.), teriam sido responsáveis pelas exumações das bacias intracratônicas/intracontinentais brasileiras.

O autor supracitado pontua ainda que as alegadas orogenias aconteceram fora do Gondwana, ou seja, nas regiões dos antigos continentes Avalonia e Laurência os quais, àquela época, estavam distantes do Gondwana, portanto não teriam reflexos tectônicos neste continente onde estavam localizadas as bacias interiores brasileiras. Todavia, mais recentemente Blakey (2008) e Scotese (2014) propõem reconstruções paleogeográficas que sugerem que desde o Devoniano houve contato entre os continentes do norte (Laurência, Avalônia, Báltica e Sibéria) e o continente do sul (Gondwana). As orogenias citadas anteriormente teriam provocado choque na borda da placa do Gondwana e estes choques poderiam ter provocado reflexos no interior da placa causando soerguimentos continentais, portanto, exumação das bacias sedimentares. As interpretações mais atuais estão levando em conta os dois fatores controladores das transgressões e regressões marinhas sobre os continentes durante o Paleozoico, ou seja, uma combinação de fatores climáticos e tectônicos, uma vez que existe consenso que é necessário haver algum tipo de subsidência (fator tectônico) para que haja preservação do registro geológico e que somente inundação dos continentes sem uma subsidência associada não deixaria registro geológico.

A discussão acima explica os eventos de subsidência e exumação bacinal durante o Paleozoico, porém, de acordo com Góes & Feijó (1994), Vaz et al. (2007) e D'Souza (2020), o evento erosivo de maior magnitude na bacia do Parnaíba aconteceu na era Mesozoica, mais precisamente no Neotriássico, após a consolidação do Supercontinente Pangea. Durante o Mesozoico a condição climática preponderante era de *Greenhouse* o que pressupõe nível eustático dos oceanos alto favorecendo transgressões marinhas sobre os continentes, logo situação favorável à deposição. Todavia, o que se observa na Bacia do Parnaíba é exatamente o contrário. A partir do Neotriássico a bacia sofreu um intenso episódio de exumação como decorrência de um soerguimento de cerca de 3 (três) km ocorrido na hoje porção norte da mesma (D'Souza, 2020).

Para esta autora o soerguimento de cerca de 3 (três) mil metros na porção norte da Bacia do Parnaíba no Neotriássico se deve ao *emplacement* sublitosférico da pluma que deu origem à *Large Igneous Province* (LIP) conhecida como *Central Atlantic Magmatic Igneous Province* (CAMP). Como a CAMP está na categoria de superplumas (Marzoli *et al.*, 1999) a mesma mantém o soerguimento da superfície por dezenas de milhões de anos (Campbell, 2007; Ernst, 2014). O relaxamento térmico da superpluma CAMP só teria acontecido cerca de 80 milhões de anos mais tarde, no Aptiano, quando a área previamente soerguida foi rebaixada e subsidiou novamente para a condição de bacia. Foi neste momento que houve a deposição da Formação Codó, o caso analisado neste trabalho.

A interpretação oferecida por D'Souza (2020) para a evolução tectônica e estratigráfica da Bacia do Parnaíba durante a Era Mesozoica, além de dar uma explicação plausível para os mecanismos controladores do soerguimento do embasamento de cerca de 3 km ocorrido na porção norte da bacia durante o Neotriássico e posterior subsidência, no Aptiano, da mesma área previamente soerguida, fornece uma explicação para a ausência da Sequência Depositional Jurássica (Fms Pastos Bons e Corda) na porção norte da bacia. Nesta

época esta área estava soerguida, portanto, acima do nível de base, e o depocentro da bacia do Parnaíba deslocou-se para o sul. Esta hipótese é comprovada neste trabalho posto que foi observado que somente nos poços do extremo sudeste da área de estudo aparecem depósitos Jurássicos, no caso, a Fm. Corda.

### **2.3- Estratigrafia da Bacia do Parnaíba**

Como já reportado anteriormente no item “Generalidades”, o registro sedimentar na Bacia do Parnaíba agrupa-se em 5 (cinco) “Sequências de Sloss” a saber: Sequência Siluriana-Eodevoniana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea. As 3 (três) primeiras Sequências de Sloss, conhecidas informalmente como “Sequências Paleozoicas” (apesar da terceira avançar até a era Mesozoica), representam, segundo Vaz et al. (2007), um ciclo completo de transgressão-regressão na escala de dezenas de milhões de anos, os quais podem ser classificados de acordo com Schlager (2004) como ciclos de sequências deposicionais de segunda ordem.

Como o caso estudado neste trabalho é a Formação Codó, a qual é parte da Sequência Cretácea, é importante reportar previamente que existe um desacordo na interpretação do conteúdo litoestratigráfico da Sequência Cretácea nas últimas duas versões oficiais da Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba. Góes & Feijó (1994) posicionam a Formação Corda na Sequência Jurássica em contato discordante com a Sequência Cretácea, sobreposta. Vaz et al., (2007), ao contrário, posicionam a Fm. Corda como cronocorrelatas às formações Grajaú e Codó, sendo as três formações tão somente a variação lateral de fácies de mais proximal (Formação Corda) à mais distal (Fm. Codó), com a Formação Grajaú no meio. Trabalhos de análises estratigráficas feitos no âmbito deste projeto, incluindo D’Souza (2020) e este TCC corroboram a interpretação de Góes & Feijó (1994), portanto esta será a carta estratigráfica a ser usada neste trabalho (Figura 2).



### 2.3.1- DETALHAMENTO DAS SEQUÊNCIAS DEPOSICIONAIS NA BACIA DO PARNAÍBA

A Sequência Siluriana corresponde ao Grupo Serra Grande, que reúne as Formações Ipu, Tianguá e Jaicós e trata-se de um ciclo transgressivo-regressivo completo. Ocorre praticamente em toda bacia, porém, aflorando somente na extremidade leste da mesma. O fim dessa sequência, como discutido anteriormente é atribuído a reflexos da Orogenia Caledoniana no paleocontinente Gondwana associado a condições climáticas de instalação de um período de icehouse concomitantemente (Caputo, 1984; Goés & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007; Blakey, 2008 e Scotese, 2014).

A Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera corresponde ao Grupo Canindé, que reúne as Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. Essas formações afloram nas regiões leste e sudoeste da bacia. Seus estratos foram depositados discordantemente sobre a Sequência Siluriana-Eodevoniana, sendo isso possível, de acordo com a discussão previamente relatada no item “Tectônica da Bacia do Parnaíba”, por se tratar de um período de calmaria tectônica próximo à área da bacia (entre eventos orogenéticos) o que favoreceria à subsidência devido, possivelmente, ao peso da carga sedimentar previamente depositada e a transgressão marinha em decorrência de um longo período de *Greenhouse* no planeta. O término dessa sequência é atribuído a reflexos da Orogenia Eoherciniana associado às consequências do *Icehouse* do Carbonífero.

A Sequência Neocarbonífera-Eotriássica corresponde ao Grupo Balsas e reúne as Formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. O registro geológico no Presente mostra esta Sequência como a mais espessa da bacia, porém com presença apenas na porção centro-sul da mesma. Tanto para Vaz *et al.* (2007) quanto para D’Souza (2021), a erosão é mais importante que a não-deposição, como principal fator na explicação da ausência deste Grupo na porção norte da bacia. Como as anteriores, no aspecto da dinâmica evolutiva do registro estratigráfico, esta sequência deposicional também representa um ciclo completo

transgressivo-regressivo, porém, sob condições marinhas rasas e restritas, onde os principais eixos de deposição se deslocaram para o centro da bacia, e os mares abertos, com ampla circulação e clima temperado (Caputo, 1984), deram lugar a mares com circulação restrita e clima quente, o que resultou em condições severas de aridez, responsáveis pelos desertos no início e no fim desse ciclo de sedimentação (Góes e Feijó, 1995). De acordo com Zalán (1991), o término da sedimentação dessa sequência é devido a um soerguimento como reflexo da Orogenia Gondwanide, porém, D'Souza (2020), como visto anteriormente oferece uma explicação alternativa baseada em dados observados na própria bacia, qual seja, o evento de soerguimento que exumou esta sequência expondo-a e erodindo-a até o embasamento na porção norte da bacia deveu-se ao *emplacement* da pluma que deu origem à CAMP.

A Sequência Jurássica, de acordo com Vaz *et al.* (2007), foi depositada em decorrência de uma subsidência, que teve origem o peso das rochas básicas da Formação Mosquito, que se somou ao da carga sedimentar então existente. Porém, também como já discutido no item Tectônica da Bacia do Parnaíba, D'Souza (2020) propõe que em decorrência do soerguimento de cerca de 3 km (chegando a exumar o embasamento) na porção norte da bacia que teve início no Neotriássico, mas que perdurou até o Eocretáceo, portanto mantendo a área norte da bacia soerguida durante todo o Jurássico o depocentro da mesma deslocou-se para o sul durante o período Jurássico onde de fato são encontradas as formações Pastos Bons e Corda com seus estratos terminando em *onlap* contra a formação Sambaíba do Mesotriássico, segundo observações feita em dados sísmicos por D'Souza (2020). Caputo (1994) baseado em trabalho de campo, também já havia demonstrado que as formações jurássicas são depositadas discordantemente sobre as formações triássicas (Sambaíba e Motuca).

A Sequência Cretácea, de acordo com Vaz *et al.* (2007) e Góes e Feijó (1994), foi depositada após uma retomada na sedimentação, em decorrência dos esforços da abertura do Atlântico. Segundo estes autores, as condições tectônicas estabelecidas causaram subsidência

da bacia conseqüentemente um novo ciclo de sedimentação, sendo uma rápida transgressão, seguida de uma retirada definitiva do mar, causando deposição exclusivamente continental e o encerramento do ciclo sedimentar (Góes e Feijó, 1994). Estes autores relacionam a subsidência regional que captou os sedimentos das formações Grajaú e principalmente Codó ao processo de rifteamento que culminaria na separação da África e da América do Sul o qual já estava em curso desde o início do Eocretáceo, porém eles não oferecem uma explicação mais detalhada sobre como um processo de rifteamento, portanto de subsidência mecânica que abre bacias do tipo rifte provocaria uma subsidência de baixa taxa, mas de grande extensão areal, típica de subsidência termal. De fato, o rifteamento relacionado à ruptura continental só se fez presente na área de estudo no Albiano, com a abertura do rifte de São Luís (Zalán, 2007).

Ao contrário da interpretação acima, D'Souza (2021), como já mencionado, atribui a subsidência de baixa taxa e grande área aos efeitos do relaxamento térmico da pluma CAMP, portanto, sem nenhuma relação com o processo de rifteamento já em curso em outras áreas e que viria a culminar com a ruptura continental no fim do Albiano, nesta porção da atual margem equatorial (Trosdorf Jr. et al., 2007; Soares et al., 2007; Zalán, 2007). Para esta autora, no início do Albiano deu-se o início da abertura do rifte de São Luís que perdurou por todo este intervalo de tempo sendo preenchido por depósitos siliciclásticos da Formação Itapecuru (Pedrão et al., 2002). O rifte de São Luís “abortou” ao final do Albiano quando a ruptura continental (*breakup*) aconteceu em outra porção mais para o norte no continente.

Após a ruptura continental os efeitos da subsidência termal pós-ruptura se fizeram sentir na área e, no presente, são evidenciados pela ocorrência da formação Itapecuru terminando em *onlap* contra a formação Codó, como demonstrados por dados sísmicos analisados no âmbito do projeto Alagoas do qual este trabalho também fez parte.

O posicionamento estratigráfico das formações cretáceas nas bacias do Parnaíba e São Luís tem sido matéria de controvérsia. Ferreira et al. (2021) fez uma síntese para mostrar o posicionamento das formações em trabalhos publicados deste 1964 (Figura 3). Apesar da divergência do posicionamento da Formação Codó, nota-se que em todas as situações a totalidade desta formação, ou pelo menos parte dela é posicionada no neoaptiano. Para este trabalho, cuja a análise não possui o nível de resolução daqueles feitos com descrição de litofácies em testemunhos ou afloramentos, será considerado, grosso modo, o posicionamento da Formação Codó no Neoaptiano

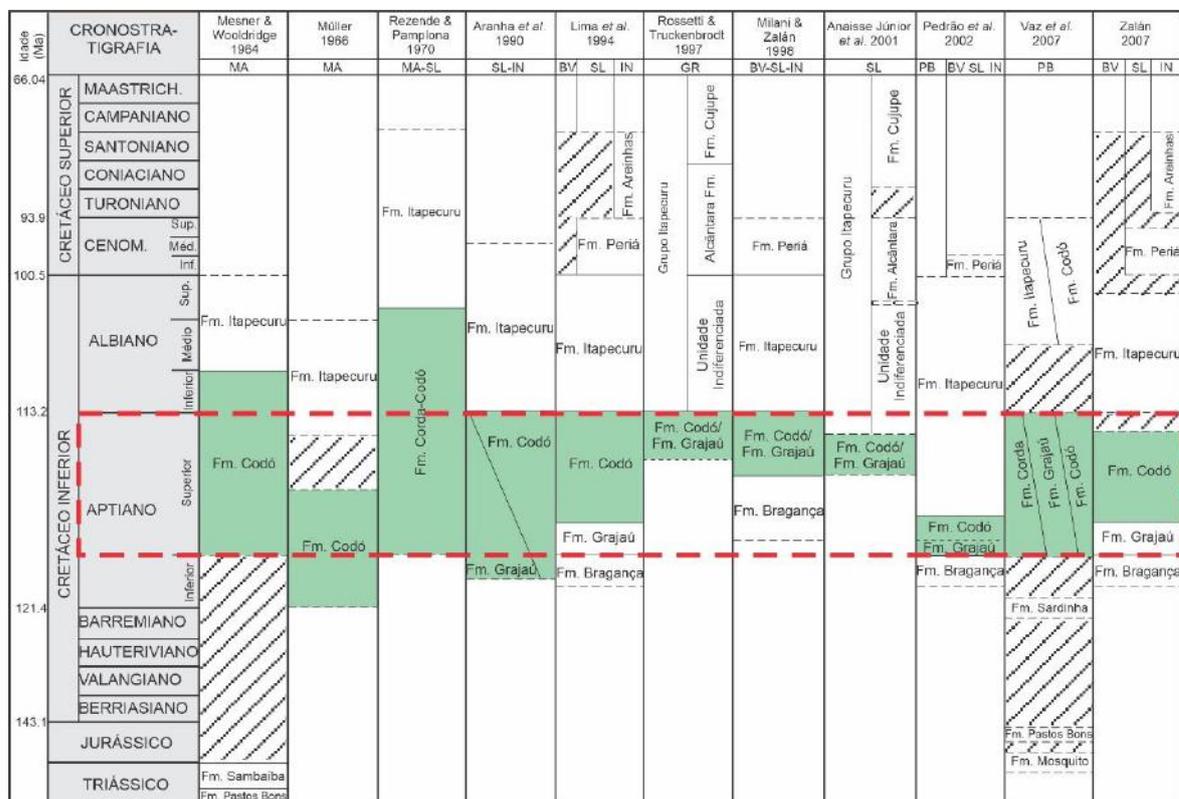


Figura 3 – Síntese do posicionamento das formações Cretáceas nas bacias do Parnaíba e São Luís modificada de Ferreira et al. (2021). Retângulo tracejado vermelho foi adicionado para mostrar que em todos os trabalhos a Fm. Codó encontra-se total, ou parcialmente posicionada no neoaptiano. Iniciais: MA e PB, Bacia do Maranhão ou Bacia do Parnaíba. SL, Bacia de São Luís. IN, Grabem de Ilha Nova. BV, Bacia Bragança-Viseu.

## 2.4- Vulcanismo na Bacia do Parnaíba

Na história tectono-estratigráfica da Bacia do Parnaíba também ocorreram eventos magmáticos que deixaram registros geológicos de um grande volume de soleiras de diabásio e

um volume menor de derrames basálticos. O evento mais conspícuo e melhor datado tem idade média de c. 200 Ma, passagem do Triássico para o Jurássico. Este evento magmático é relacionado à *Large Igneous Province* (LIP) conhecida como *Central Atlantic Magmatic Province* (CAMP) (Marzoli et al., 1999; Mizusaki et al., 2002). Litoestratigraficamente estas rochas ígneas são denominadas de Formação Mosquito (Góes & Feijó, 1994; Vaz et al., 2007). Há também outras rochas magmáticas datadas com idades que vão de 14 Ma a 150 Ma. As rochas com estas idades são menos volumosas que as anteriores e recebem o nome litoestratigráfico de Formação Sardinha.

## **2.5- Tectônica da Bacia de São Luís**

Zalán (2007) propõe que a Bacia de São Luís é uma bacia do tipo pull-apart, formada em um regime transtensional durante o Albiano, e que não apresenta uma fase de subsidência termal, tendo como característica geometria de rombo-grábens e sem sedimentação pós-rifte. Essa transtensão seria consequência da movimentação nas zonas de fraturas Romanche e São Paulo. Essa bacia se desenvolveu sobre a porção arqueana do Cráton de São Luís, e apenas sua extremidade meridional se desenvolveu sobre a Faixa Móvel de Gurupi, de idade neoproterozóica (Zalán, 2007).

O graben ou rifte de São Luís está geneticamente ligada ao processo de rifteamento que culminou com a ruptura continental do Gondwana no Eocretáceo individualizando os continentes África e América do Sul. É importante ressaltar que a ruptura continental na maior parte da hoje margem continental brasileira aconteceu no final do Aptiano (Moreira et al., 2007; Winter et al., 2007; Condé et al., 2007), porém, à norte da zona de fratura Romanche o processo de rifteamento tardou por mais aproximadamente 10 milhões de anos rompendo somente no final do Albiano, neste contexto estão as bacias da Margem Equatorial

Brasileira de Barreirinhas, Pará-Marahão e Foz do Amazonas (Trosdorf Jr. et al., 2007; Soares et al., 2007 e Figueiredo et al., 2007).

## 2.6- Estratigrafia da Bacia de São Luís

Zalán (2007) propõe que a bacia é constituída por três superseqüências deposicionais: a Superseqüência Paleozóica, a Superseqüência Pré-Rifte e a Superseqüência Rifte.

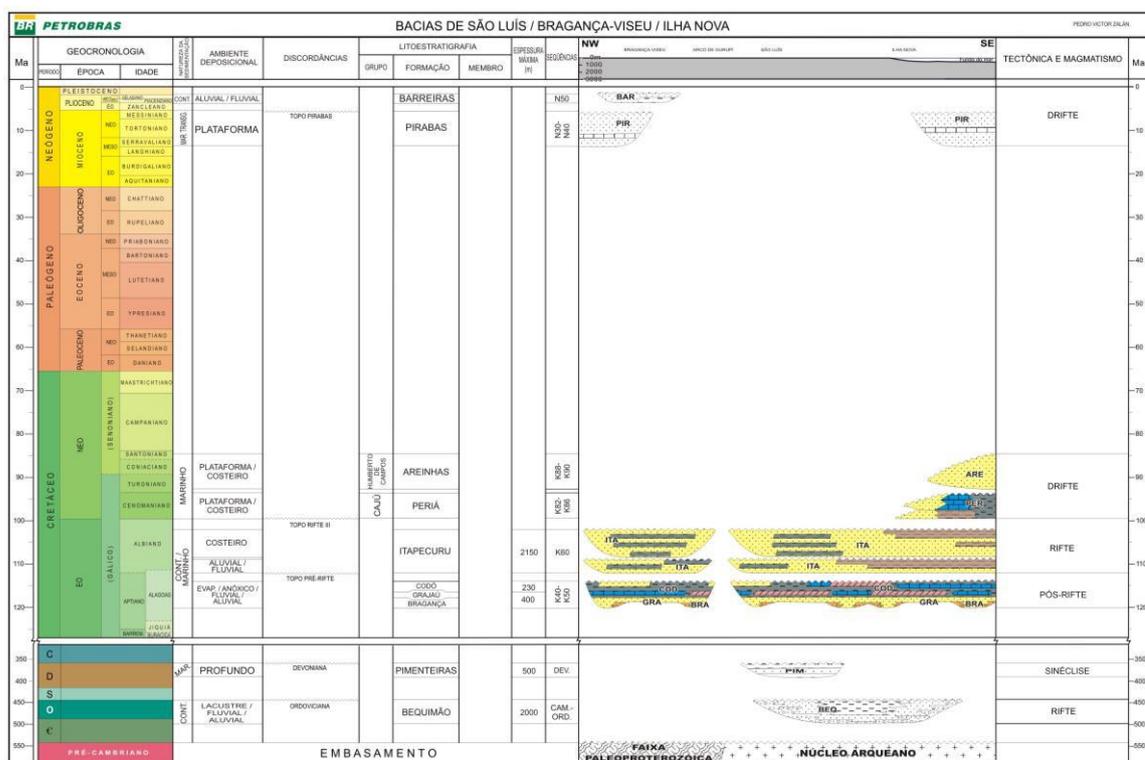


Figura 4 – Carta estratigráfica da bacia de São Luís proposta por Zalán (2007)

A Superseqüência Paleozóica é dividida em duas seqüências deposicionais: a Sequência Cambro-Ordoviciano e a Sequência Devoniana. A Sequência Cambro-Ordoviciano compõe o substrato da Bacia de São Luís e corresponde à Formação Bequimão, composta de pelitos, arenitos, conglomerados e diamictitos levemente metamorfizados. Na Sequência Devoniana são encontradas na borda sul da bacia, rochas sedimentares preservadas pertencentes à Bacia do Parnaíba, sob depósitos aptianos e albianos. Essa seqüência é composta de arenitos e

folhelhos, subordinadamente basaltos e diamictitos, correlacionáveis a Formação Pimenteiras (Zalán, 2007).

A Supersequência Pré-Rifte corresponde as formações Bragança, Grajaú e Codó (Lima *et al.* 1994, apud Zalán, 2007). Dados litofaciológicos e bioestratigráficos mostram que essa supersequência apresenta o registro da primeira invasão marinha no Mesozoico na margem continental brasileira.

A Formação Bragança, descrita por Lima *et al.* (1994) apud Zalán (2007), é composta de sedimentos clásticos grossos como arenitos cinzentos e conglomerados, por arenitos médios e siltitos verdes subordinados, tendo essa formação idade neoaptiana.

A Formação Grajaú é composta de arenitos finos a médios, creme a brancos de natureza fluvial. Foi atribuída a essa formação a idade Neoaptiana pela presença de palinomorfos da zona P270 (Lima *et al.*, 1994).

A Formação Codó é composta de folhelhos negros, betuminosos, níveis de anidrita e calcilito, com intercalações de arenitos (Lima *et al.*, 1994). Segundo Zalán (2007), a Formação Codó pode ser dividida em três intervalos: Codó inferior, Codó médio e Codó superior. O Codó inferior é composto predominantemente de arenitos, o Codó médio por pelitos, carbonatos e evaporitos e o Codó superior de folhelhos, carbonatos, arenitos e evaporitos. O ambiente deposicional dessa formação é interpretado como lagunar, ligado a um mar epicontinental raso e anóxico, eventualmente restrito, onde precipitavam evaporitos (anidrita e raramente halita).

A Supersequência Rifte é composta pela Formação Itapecuru, constituída por arenitos médios e finos, conglomerados, folhelhos e siltitos de cor cinza e vermelha. Tem o ambiente deposicional interpretado basicamente como fluvial com intercalações de arenitos. Essa formação é interpretada com uma idade albiana (Zalán, 2007).

## 2.7 - Nova carta estratigráfica para as bacias do Parnaíba e de São Luís

Baseada em análise de dados sísmicos que sugerem que o ambiente tectônico e estratigráfico para a bacia do São até a deposição da formação Codó era o mesmo da bacia do Parnaíba, D'Souza (2020) propôs uma carta estratigráfica única para a porção norte da bacia do Parnaíba e para a bacia de São Luís. Esta é a área de estudo deste trabalho, daí porque a importância desta nova carta para este trabalho.

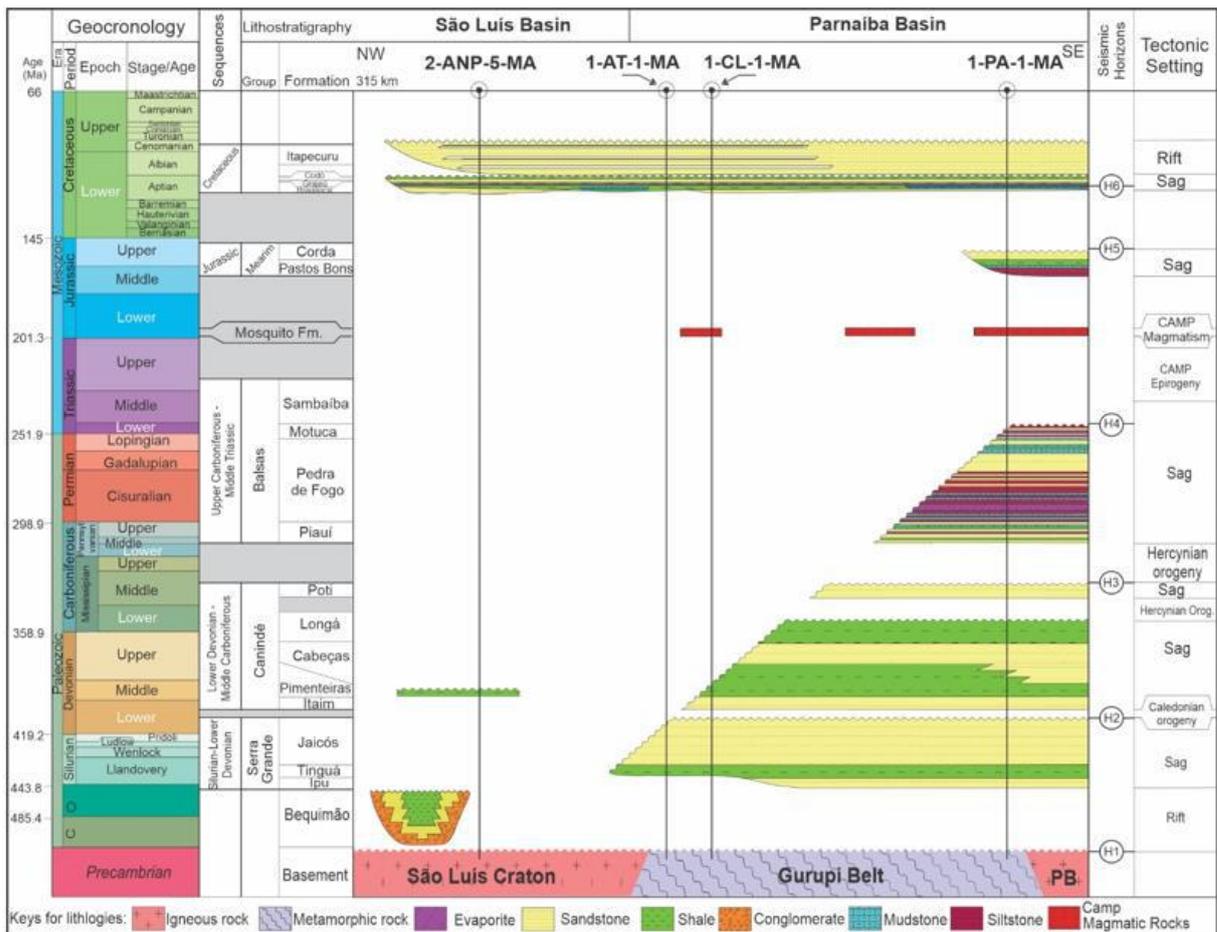


Figura 5 – Carta estratigráfica unificada para o norte da bacia do Parnaíba e para a bacia de São Luís proposta por D'Souza (2020).

### 3 – REFERENCIAIS TEÓRICOS

Este trabalho tem sua fundamentação teórica baseada em dois métodos de análise distintos, porém, quando integrados fornecem uma ferramenta poderosa para interpretações relacionadas à Estratigrafia e à Geologia sedimentar, quais sejam: (1) interpretação dos padrões das curvas de perfis geofísicos de poços, neste caso específico, o perfil de *Raios Gama* como um *proxy* para interpretação da variação vertical de litofácies em um determinado ponto de uma bacia sedimentar (Rider, 2002); (2) interpretação da evolução estratigráfica, também unidimensional, através da “ferramenta” da Estratigrafia de Sequências, usando o método de interpretação de ciclos Transgressivos e Regressivos como uma decorrência da variação do nível de base da bacia (Karagodin, 1975; Johnson & Murphy, 1984; Embry & Johannessen, 1992; Embry, 2002).

#### 3.1 - Perfis Geofísicos

O perfil geofísico é a representação do resultado do registro de parâmetros geofísicos ao longo do poço, sendo esses parâmetros registrados em função da profundidade do poço (Rider, 2002). Esses perfis elétricos de acordo com Nery (1990), se resumem em propriedades elétricas, acústicas e radioativas, obtidas por um sensor que se desloca continuamente pelo poço e que diferenciam as rochas.

Os perfis geofísicos são usados por trazerem dados de subsuperfície, sendo esse, quando comparado aos dados recuperados através de testemunhos, o método mais rápido e barato de se obter essas informações.

Existe diferentes tipos de perfis, onde cada um analisa um diferente parâmetro geofísico da rocha, sendo exemplos os perfis de Potencial Espotâneo (SP), Resistividade, Raios Gama (GR), Sônico (DT), Neutrão e Densidade.

Nesse trabalho, foi utilizado o perfil de Raios Gama e perfil de Sônico, usados para a análise das seqüências sedimentares da Formação Codó.

Uso	Geologia Geral						Geologia Reservatório	Geoquímica	Petrofísica					Sísmica				
	Litologia - geral	Vulcânicas Incomum	Evaporitos Litologia	Identificação Mineral	Correlação: estratigrafia	vdbsdbfsbffb	Identificação de Fraturas	Identificação de Sobrepressão	Identificação de Rocha Geradora	Maturação	Porosidade	Permeabilidade	Volume de Folhelho	Salinidade da Água	Saturação de Hidrocarbonetos	Identificação de Gás	Intervalo de Velocidade	Impedância Acústica
SP					-	-					-	+	*					
Resistividade	-		-		-	-		+	+	+	-			*	-			
Raios Gama (GR)	-	-	+	-	-	-			+				+					
Raios Gama Espectral	-	-	+	+	-	-			+				+					
Sônico (DT)	+		-		-		+	+	+		*					-	*	*
Neutrão	+	-	-	-		-			-		*		-			-		
Densidade	+	-	-	-		-	+	-	+		*					-		*
- (Essencial) Uso Qualitativo + Uso Quantitativo e Semi-Quantitativo * Uso estrito																		

Figura 6 – Quadro com os perfis geofísicos mais comuns e os tipos de informações que fornecem tanto a partir da avaliação quantitativa (Análise Petrofísica), quanto a partir da avaliação qualitativa (Interpretação Geológica de Perfis). Modificado de Rider (2002).

### 3.1.1 - PRINCÍPIOS DOS PERFIS DE RAIOS GAMA

A radiatividade é a propriedade de emissão espontânea de radiação de alguns átomos, por efeito de instabilidade do seu núcleo. Nery (1990) define que os perfis de GR representam a medida da somatória da radioatividade natural proveniente do decaimento de três isótopos radiativos presentes nas rochas: Urânio (U235), Potássio (K40), e Tório (Th232). Rochas ígneas, metamórficas e sedimentares apresentam diferentes concentrações destes elementos radiativos. Dentre as rochas sedimentares, aquelas com maiores concentrações dos elementos supracitados apresentam maiores emissões de radiatividade natural. Estes elementos são encontrados com concentrações diferentes em diferentes rochas sedimentares.

Os perfis de raios gama (*doravante abreviado pela sigla GR, que dizer Gamma Ray*) representam os registros da emissão da radiação gama das rochas emitida pelos elementos U,

K e Th. Como outros perfis geofísicos, o GR, pode tanto ser interpretado de forma quantitativa, quanto qualitativa (Asquith & Krygowski, 2004). Na interpretação quantitativa, usam-se os valores numéricos do GR para cálculo de volume de argila (dado de forma percentual) nas rochas sedimentares através da avaliação petrofísica. Qualitativamente, as curvas de GR são usadas na “avaliação geológica de perfis” de acordo com os princípios estabelecidos por Rider (2002) que propõem a caracterização das chamadas eletrofácies como um *proxy* para a interpretação de litofácies. De acordo com este autor, eletrofácies são um intervalo vertical de rocha com características semelhantes em perfis geofísicos de poço. Estas características semelhantes em perfis, por sua vez, representariam intervalos de rochas com característica semelhantes de litofácies.

O princípio de funcionamento do perfil de GR é muito simples. A ferramenta é basicamente um cintilômetro acoplado a um fotomultiplicador com espectro de frequências adaptadas para ler as emissões de radiação gama dos elementos químicos U, K e Th. As primeiras ferramentas de GR criadas na década de 1960 faziam tão somente a leitura da somatória da radiação gama emitida por estes 3 (três) elementos. No início da década de 1980 surgiram as ferramentas de GR que faziam a leitura separada do espectro de emissão de radiatividade de cada um dos elementos. Esta ferramenta foi chamada de GR espectral e como resultado fornece 3 (três) curvas distintas, uma para a emissão de radiatividade de cada um dos elementos. Desta forma, quando se tem a leitura da somatória das emissões de radiatividade dos 3 (três) elementos denomina-se “GR total” e quando se tem a leitura discretizada de cada um dos elementos, chama-se “GR espectral”. Neste trabalho, apenas um poço analisado possui leituras feitas com a ferramenta GR espectral, o qual, neste caso, possui curvas independentes para cada um dos elementos supracitados, todos os outros perfis analisados de todos os outros poços são de GR total.

As curvas de GR nos perfis da indústria petrolífera são apresentadas em uma escala própria denominada API (American Petroleum Institute). Via de regra, a maioria das rochas apresenta leitura de GR entre 0 (zero) e 150 (cento e cinquenta) API, por isso, também via de regra as escalas de GR nos perfis variam de 0-150. Porém, alguns folhelhos carbonosos podem chegar a até 300 API.

### 3.1.2 - OCORRÊNCIA DE URÂNIO, POTÁSSIO E TÓRIO

O Urânio tem como principal fonte as rochas ígneas ácidas, que em condições oxidantes, formam sais solúveis estáveis como o dióxido de urânio ( $UO_2$ ), transportados pelas águas dos rios (Rider, 2002). Segundo Durrance (1986; *apud* Rider, 2002), 90% do Urânio dos rios é carregado associado a argila e não como uma solução uma vez que o Urânio é encontrado em concentrações maiores em sedimentos suspensos nos rios do que em sedimentos de fundo. Foram sugeridas por Serra (1979; *apud* Rider, 2002), três maneiras de como o urânio se incorpora aos sedimentos pelas águas dos rios ou mares, sendo a primeira a **precipitação química em ambientes ácidos e redutores**, a segunda a **adsorção por matéria orgânica, ou plantas vivas e animais**, e a terceira, as **reações químicas em rochas ricas em fosfato**.

Segundo Spirakis (1993), dentre estas três, as duas primeiras se potencializam uma vez que ocorrem nas mesmas condições ambientais, ou seja, em ambientes pobres (disóxicos) ou desprovidos (anóxicos) de oxigênio. Segundo este autor, o urânio redutor tem muito mais solubilidade do que o urânio oxidado e, em função desta característica existe uma forte associação de urânio redutor com matéria orgânica, a qual também está associada a ambientes redutores. Apesar das altas concentrações de matéria orgânica (acima de 5% do total do volume da rocha) estarem sempre associadas com ambientes redutores, anóxicos, também ocorre matéria orgânica, logo, também ocorre urânio, em rochas argilosas depositadas em

ambientes não totalmente redutores (disóxicos). Nestes ambientes as rochas sedimentares a serem depositadas serão sempre rochas argilosas.

Embora a maior quantidade de Urânio em rochas argilosas esteja relacionada aos processos relatados acima, quais sejam, deposição em ambientes redutores e adsorção deste elemento à matéria orgânica, também ocorrerá Urânio em rochas argilosas não relacionadas a ambientes redutores uma que segundo Durrance (1986; *apud* Rider, 2002), Urânio é carregado em suspensão nos rios sempre associado às argilas. O exposto acima demonstra que o Urânio é um elemento comum de ser encontrado associado a sedimentos argilosos independente de estes serem depositados em ambientes redutores, ou não. É claro que nestes ambientes a presença daquele elemento será muito maior.

Além do Urânio, o Potássio e o Tório também podem ser encontrados em rochas argilosas. O Potássio é o elemento mais comum e quimicamente ativo nas rochas. A concentração de potássio nas rochas sedimentares varia de acordo com os minerais presentes, sendo encontrado em: (1) na estrutura de filosilicatos (argilominerais); (2) ocorrendo quimicamente como um sal em evaporitos; e (3) em minerais formadores de rocha como micas, sendo o principal deles os feldspatos. Rider (2002) indica que folhelhos/argilitos formados por uma mistura de diversos tipos de argilominerais faz com que a concentração de potássio nestas rochas seja bastante alta podendo chegar a cerca de 2% a 3,5%.

Da mesma forma que o Urânio, o Tório presente nos folhelhos também se origina em sua maioria como partículas insolúveis com origem em rochas ígneas ácidas a intermediárias. Estabilidade e a solubilidade limitada na água em baixas temperaturas, segundo Nery (1990) são características desse elemento. O transporte do Tório geralmente é na forma de minerais detríticos estáveis como zircão, torita, monazita, epidoto e esfeno, onde a incorporação desse elemento aos sedimentos de argilitos e folhelhos acontece antes da ocorrência de processos diagenéticos (Rider, 2002).

Como visto, rochas argilosas sempre contém Urânio e ainda podem conter Potássio e Tório, ou seja, os 3 elementos lidos pela ferramenta de perfilagem de GR, por esta razão este perfil é usado corriqueiramente para a interpretação de argilosidade nas rochas sedimentares, seja de forma quantitativa (petrofísica), seja de forma qualitativa (interpretação geológica de perfis).

Não são somente as rochas puramente argilosas como folhelhos e argilitos que apresentam altos valores de leituras nos perfis de GR como função dos processos discutidos acima. Outros tipos de rochas sedimentares que contenham matriz argilosa também apresentam valores relativamente altos de GR. Desta forma, o perfil de GR é usado na interpretação do teor de argilosidade de rochas como arenitos, carbonatos e conglomerados (Asquith & Krygowski, 2004). Rider (2002) propõe que a variação de argilosidade em diferentes tipos de rochas condicionam diferentes padrões de curvas de GR as quais podem ser usadas para interpretar variações de litofácies (este assunto será discutido mais detalhadamente à frente).

Apesar das rochas argilosas ou rochas com matriz argilosa serem muito sensíveis à leitura do perfil de GR por conterem os três (ou pelo menos um deles, o Urânio) elementos radiativos cuja emissão de raios gama são detectados pela ferramenta de GR, algumas rochas arenosas e/ou conglomeráticas também podem apresentar altos valores de leituras de GR. Estas rochas são aquelas que contém minerais com K ou Th, ou seja, arenitos/conglomerados arcoseanos, ricos em K-feldspatos e líticos, ricos em minerais pesados que contenham o Th em suas estruturas, como por exemplo, monazita, zircão, torita, epidoto e esfeno. Todavia, como sabido, K-feldspatos são minerais instáveis quimicamente e, portanto, são normalmente encontrados em locais restritos próximos às áreas fontes de sedimento e minerais pesados acontecem na fração dos “traços” nas rochas sedimentares. No terceiro vértice do triângulo de classificação dos arenitos estão os arenitos ortoquartzosos (Pettijohn, 1957). Estes arenitos

por serem ricos em quartzo, logo desprovidos de minerais com elementos radiativos apresentam baixos valores nos perfis de GR.

Somado a isso, há o fato de que os poços da indústria petrolífera, que representam a principal fonte de dados para a interpretação de litofácies a partir do padrão das curvas dos perfis de GR, são perfurados em situações bacinais não favoráveis à ocorrência de arenitos/conglomerados arcoseanos e líticos, portanto, neste tipo de situação e sendo o dado interpretado oriundo da indústria petrolífera, pode-se afirmar que os altos valores de GR lidos pelos perfis são decorrente de argilosidade e suas variações, segundo sugeridos por Rider (2002) representam variações de litofácies. Esta é a base a análise que será feita neste trabalho.

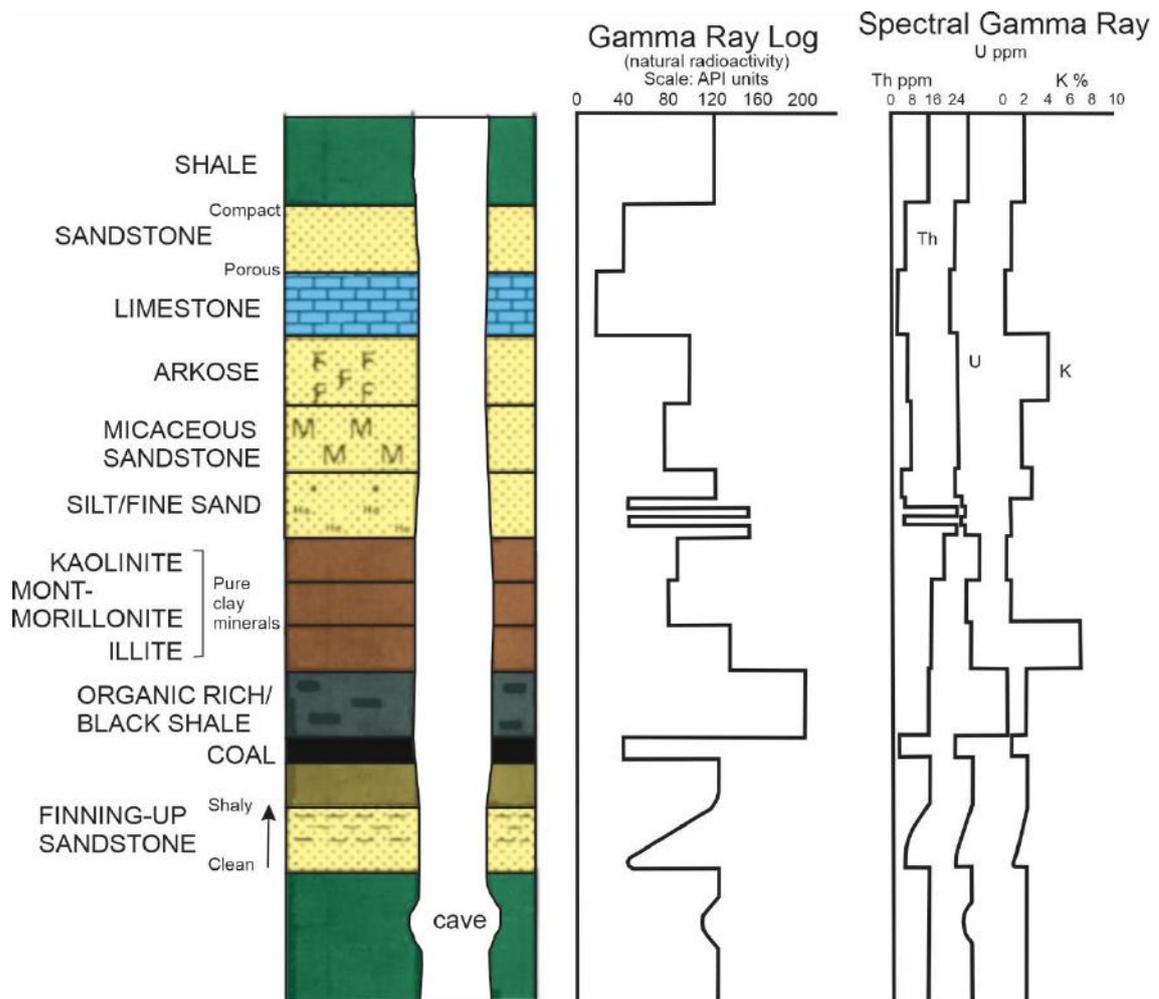


Figura 7 – Seção sedimentar idealizada com diferentes litologias (identificadas na figura) empilhadas e a resposta aproximada do perfil de GR Total (esquerda) e Espectral (direita). Modificado de Rider (2002).

### 3.1.3 - INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DOS PERFIS DE RAIOS GAMA

O uso dos perfis geofísicos adquiridos em poços perfurados pela indústria de petróleo como um *proxy* para interpretação geológica tem sido por décadas uma atividade corriqueira e cientificamente aceitável. Na década de 1970 foi desenvolvida por geólogos da Shell, na área da Costa do Golfo dos Estados Unidos, um esquema básico de classificação de estratos de arenitos baseados no formato da curva do perfil de Potencial Espontâneo (SP) (Serra & Sulpice 1975, *apud* Rider 2002). Posteriormente, a mesma técnica foi aplicada aos perfis de GR e tem sido usada até os dias atuais com grande sucesso, principalmente após as proposições teóricas sobre o tema apresentadas por Rider (2002). O sucesso do GR neste tipo de análise deve-se ao fato de o mesmo não sofrer influência do fluido contido nos poros das rochas, portanto apresentar resposta somente das características da litologia, e também por ser uma ferramenta simples e barata podendo ser corrido em toda extensão de poços muito profundos, alguns com cerca de 5 km de profundidade,

Considerando o que foi discutido no item anterior referente à resposta do perfil de GR como resultado da argilosidade das rochas, Rider (2002) propôs que a variação vertical na leitura do perfil de GR representa uma variação vertical de litofácies. Baixos valores de GR indicam rochas com baixo conteúdo de argila e altos valores de GR, rochas com altos teores de argila. No caso de se considerar somente uma sucessão deposicional de rochas siliciclásticas pode-se inferir que os baixos valores de GR representam rochas arenosa ortoquartzosas (ou próximas disso) desprovidas de matriz argilosa. Este tipo de leitura também permite uma inferência sobre a energia do ambiente deposicional no qual foi depositado esta rocha, qual seja, um ambiente de alta energia (depósitos eólicos, leitos de canais em depósitos fluviais, depósitos oriundos de correntes de turbidez, etc). Por outro lado, altos valores de GR indicam rochas lamosas, logo ambientes de baixa energia (depósitos

hemipelágicos em bacias marinhas ou lacustres, depósitos de pró-delta, depósitos de planície de inundação em sistemas fluviais, etc).

Antes mesmo do trabalho de síntese e cientificamente substanciado sobre o assunto apresentado por Rider (2002) já se usava de forma pragmática na indústria petrolífera a associação do formato da curva do perfil de GR com litofácies. Destes primórdios firmou-se na interpretação geológica de perfis a identificação de 5 (cinco) formatos padrões de curvas como representativos de diferentes associações de litofácies em rochas sedimentares variando no range entre arenitos e folhelhos/argilitos (Rider, 2002; Holz, 2012), quais sejam: ***Padrão de Sino***, representa associação de litofácies de afinamento granulométrico para o topo; ***Padrão de Funil***, representa o inverso, ou seja, aumento da granulometria para o topo; ***Padrão de Cilindro ou caixa***, sem variação granulométrica; ***Padrão Irregular***, variação intermitente de litofácies; ***Padrão Simétrico***, representa tanto um padrão de aumento da granulometria para o topo com subsequente inversão para afinamento para o topo, quanto o contrário. Este padrão pode ser confundido com funil sobre sino e sino sobre funil. A diferença é muito sutil e reside no fato de que o padrão simétrico apresenta um formato aproximadamente arredondado não sendo muito evidentes os clássicos padrões de sino e funil (Figura 8).

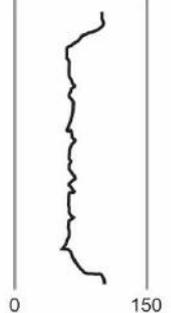
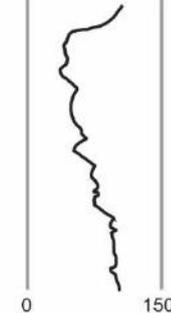
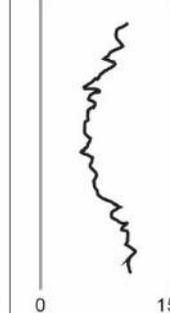
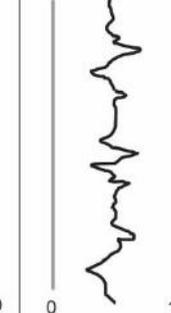
Cilíndrico ou "em caixa"	Funil ou "sino invertido"	Sino	Simétrico	Irregular
Litologia "limpa" sem tendência	Topo abrupto granocrescente	Base abrupta granodecrescente	Topo e base gradual ("arredondado")	Mistura de litologias sem tendência
				
0 150	0 150	0 150	0 150	0 150
<b>Possibilidades:</b> -Eólico -Fluvial entrelaçado -Recife -Plataforma carbonática	<b>Possibilidades:</b> -Barra de boca de distributário -Ilha de barreira -Leque Submarino	<b>Possibilidades:</b> -Barra fluvial em pontal -Barra de Maré -Sistema arenoso transgressivo	<b>Possibilidades:</b> -Unidades granodecrescentes e granocrescentes amalgamadas	<b>Possibilidades:</b> -Planície de inundação -Rampa Carbonática -Preenchimento de canyon submarino

Figura 8 – Padrões de perfis de GR com resposta à variação da variação vertical de litofácies. Todas as informações relevantes estão na figura. Modificado de Holz (2012).

### 3.1.4 - ELETROFÁCIES E ELETROSSEQUÊNCIAS

Os padrões clássicos mostrados no item anterior referem-se apenas a situações de empilhamento sedimentar de intercalações entre arenitos e folhelhos, mas há muitas outras situações em que outros tipos de rochas condicionam diferentes padrões de perfis de GR. Estes diferentes padrões são chamados de **eletrofácies** os quais podem sugerir sistemas deposicionais variados (Figura 9). Rider (2002) define eletrofácies como as respostas e características de perfis geofísicos que são distintos o suficiente para serem separados de outras eletrofácies, sendo um conjunto de eletrofácies denominado como uma **eletrossequência**. Para o autor, as eletrossequências têm dezenas de metros de espessura e, através de sua análise é, possível retirar informações e com isso, interpretar litofácies, sistemas e sequências deposicionais.

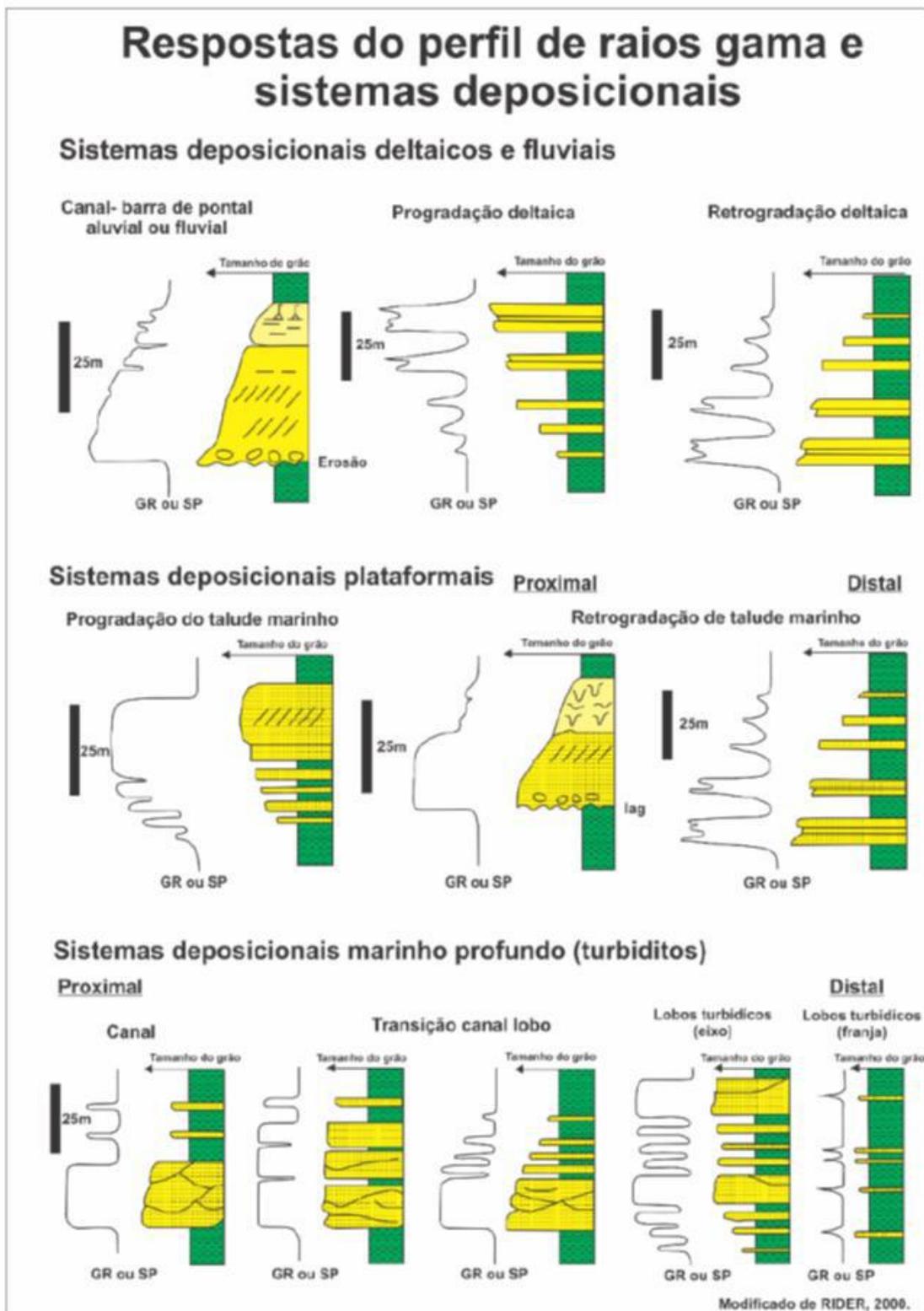


Figura 9 – Padrões de perfis de GR com resposta à variação da variação vertical de litofácies. Todas as informações relevantes estão na figura. Fonte: Bianchini, 2018 após modificação de Rider (2002).

Foi proposto por Rider (2002) três etapas essenciais para uma análise adequada de eletrosequências, sendo elas: A interpretação litológica, a interpretação das eletrofácies e por último a análise das eletrosequências.

Para a interpretação litológica, primeiramente se plotam os perfis a serem correlacionados usando a mesma escala vertical e se faz controle de qualidade para se editar valores espúrios que não pertencem ao sinal emitido pelas rochas. Após isso, correlaciona-se as informações com a litologia descrita pelas amostras de calha ou testemunho. Este último tem muito mais precisão que o primeiro por amostrar o registro contínuo (caso não haja perdas, o que é razoavelmente comum acontecer), todavia, como as operações de testemunhagens apresentam alto custo, os testemunhos, quando existem nos poços da indústria, são apenas de intervalos muito pequenos em relação ao todo do poço. Assim sendo, a descrição litológica em escala de poço é feita de fato com as amostras de calhas, as quais são coletadas pontualmente em espaçamentos que variam em múltiplos de 3 m, em um range que vai de 3 m a 18 m. É importante pontuar que a litologia interpretada nos poços da indústria são sempre uma combinação entre as descrições de amostras de calha e a interpretação de perfis, dentre os quais o GR, por ser o perfil que normalmente cobre todo, ou quase todo, o poço, tem grande importância.

De acordo com Rider (2002), para se proceder a interpretação das eletrofácies em perfis de GR, como em qualquer outro perfil, é necessário primeiro se estabelecer uma linha de base vertical a qual separará à sua esquerda rochas com baixo teor de argilosidade e à direita aquelas com alto teor de argilosidade. Quando se processa cálculos quantitativos a partir da análise petrofísica, esta linha é o resultado destes cálculos, porém, quando se faz somente a interpretação geológica de perfis é uma abordagem qualitativa, a linha de base é traçada baseada uma interpretação subjetiva do intérprete.

A análise de eletrosequências deve ser feita da base para o topo de um registro estratigráfico (Rider op. cit.). A interpretação é feita após a interpretação das litofácies conjugada com a interpretação das eletrofácies. Informações adicionais como as litoestratigráficas (topos de grupos, formações, membros), cronoestratigráficas (topos de cronozonas) e bioestratigráficas (topos de biozonas) são importantes para a análise de eletrosequências. Essa análise parte do princípio de se fazer um empilhamento de eletrofácies dentro de um arcabouço estratigráfico onde este represente tratos de sistemas deposicionais, os quais por sua vez, são agrupados em uma eletrosequência que, em síntese, representa uma sequência deposicional como estabelecida pelos princípios de análise da Estratigrafia de Sequências (Van Wagoner *et al.*, 1990 *apud* Rider, 2002) (Figura 10).

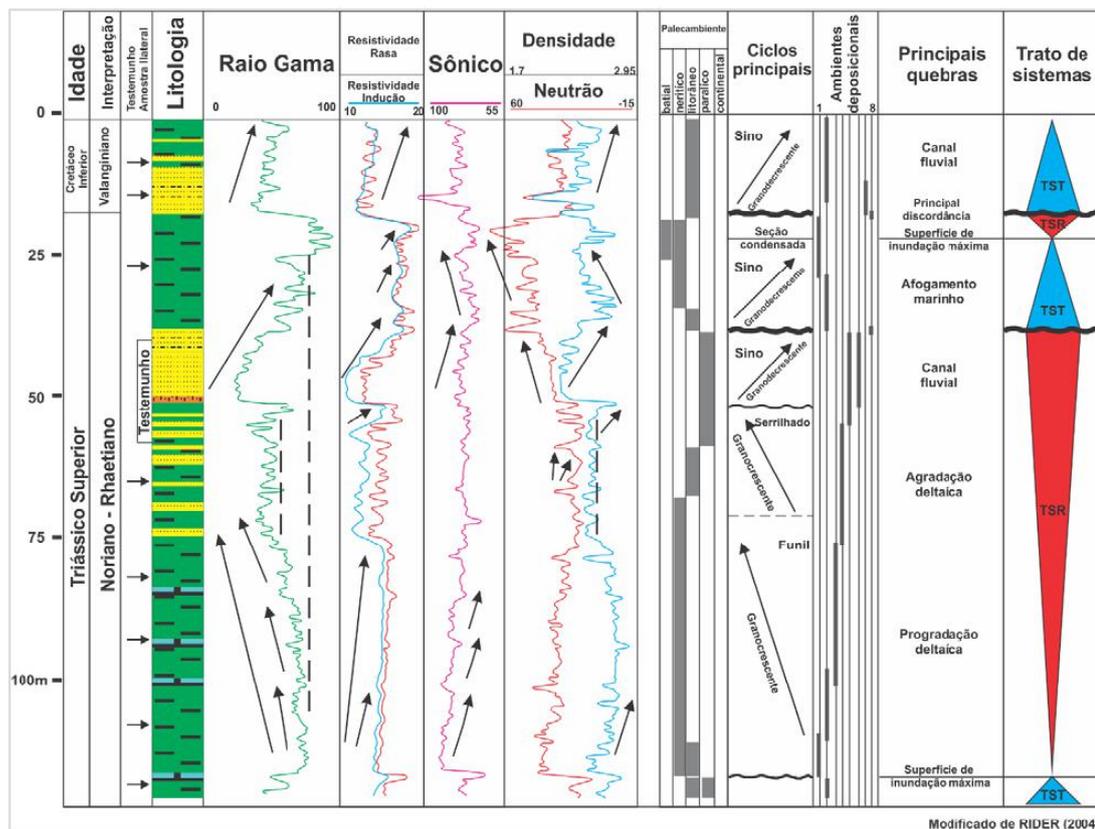


Figura 10 – Figura esquemática mostrando a interpretação de paleobatimetria, ambientes deposicionais e sequências deposicionais a partir da análise de eletrofácies. Modificado de Rider (2002).

A interpretação de eletrofácies e eletrossequências em vários poços em uma bacia pode ser usada para a confecção de mapas de distribuição geográfica de fácies (Saitta e Visser, 1968; Doventon, 1986; Finley e Tyler, 1986; Cant, 1992 *apud* Rider, 2002).

Nesse trabalho as curvas de GR de 14 poços nas bacias de São Luís e Parnaíba, MA, Brasil foram analisadas tomando como base os princípios teóricos expostos acima e usando como estudo de caso a Formação Codó. Para a interpretação da evolução estratigráfica da Formação Codó usou-se o método de análise da Estratigrafia de Sequências de ciclos Transgressivos e Regressivos como proposto por Karagodin (1975); Johnson & Murphy (1984); Embry & Johannessen (1992); Embry (2002). Este Referencial Teórico será discutido no tópico seguinte.

### **3.2- Estratigrafia de Sequências**

Considerada como uma das mais recentes revoluções conceituais da geologia sedimentar, a Estratigrafia de Sequências renovou a análise estratigráfica (Miall 1995, *apud* Catuneanu, 2009). Ela é definida por Catuneanu *et al.* (2009) como um método de estudo focado na análise das mudanças faciológicas e do caráter geométrico dos estratos deposicionais; identificação de superfícies chaves, a fim de entender o preenchimento da bacia de forma dinâmica, tanto no espaço, quanto no tempo, como resultado da variação do nível de base. A Estratigrafia de Sequências além de fornecer explicações sobre a dinâmica de preenchimento de uma bacia sedimentar, tem caráter preditivo, por conta disso é muito usada na indústria petrolífera uma vez que petróleo é o principal bem mineral extraído de bacias sedimentares (Catuneanu, 2006).

Unidade básica da Estratigrafia de Sequências é a Sequência Depositional. O termo Sequência Depositional apareceu pela primeira vez na literatura geocientífica em 1949 em um artigo publicado por L. L. Sloss, W. C. Krumbein, e E. C. Dapples (Dott Jr., 2014). Para

estes autores uma Sequência deposicional é uma sucessão de estratos concordantes limitadas no topo e na base por discordâncias regionais que representem exposição total do registro sedimentar de uma dada bacia. Apesar destes autores não terem usado o termo Estratigrafia de Sequências, pode-se dizer que por ser a Sequência Depositional a unidade básica da análise a Estratigrafia de Sequências como definida nos conceitos atuais, e por ser a proposição de Sequência Depositional dos autores supracitados, estes, a partir de uma perspectiva *a posteriori*, podem ser considerados como os fundadores da Estratigrafia de Sequências.

Posteriormente, Sloss (1963) propôs uma interpretação para a evolução estratigráfica de todas as bacias do tipo sinéclise intracontinentais dos Estados Unidos definindo várias Sequências Depositionais cronocorrelatas em todas elas e de abrangência temporal de dezenas de milhões de anos. Estas sequências deposicionais representam, segundo o autor, um ciclo completo de subsidência e exumação total de uma bacia sedimentar, tendo, segundo o autor, a tectônica jogado um papel fundamental na exumação da bacia para deixá-la totalmente subaérea. Estas sequências firmaram-se na literatura geocientífica pela denominação de “Sequências de Sloss”. Catuneanu (2006) cita que além dos trabalhos pioneiros de Sloss, Krumbein & Dapples (1949) e Sloss (1963), outros autores também deram contribuições para a conceituação moderna de Estratigrafia de Sequências, quais sejam, Grabau (1913), Barrell (1917), Wheeler & Murray (1957), Wheeler (1958, 1959, 1964), Curry (1964) e Frazier (1974), todos *apud* Catuneanu (2006)

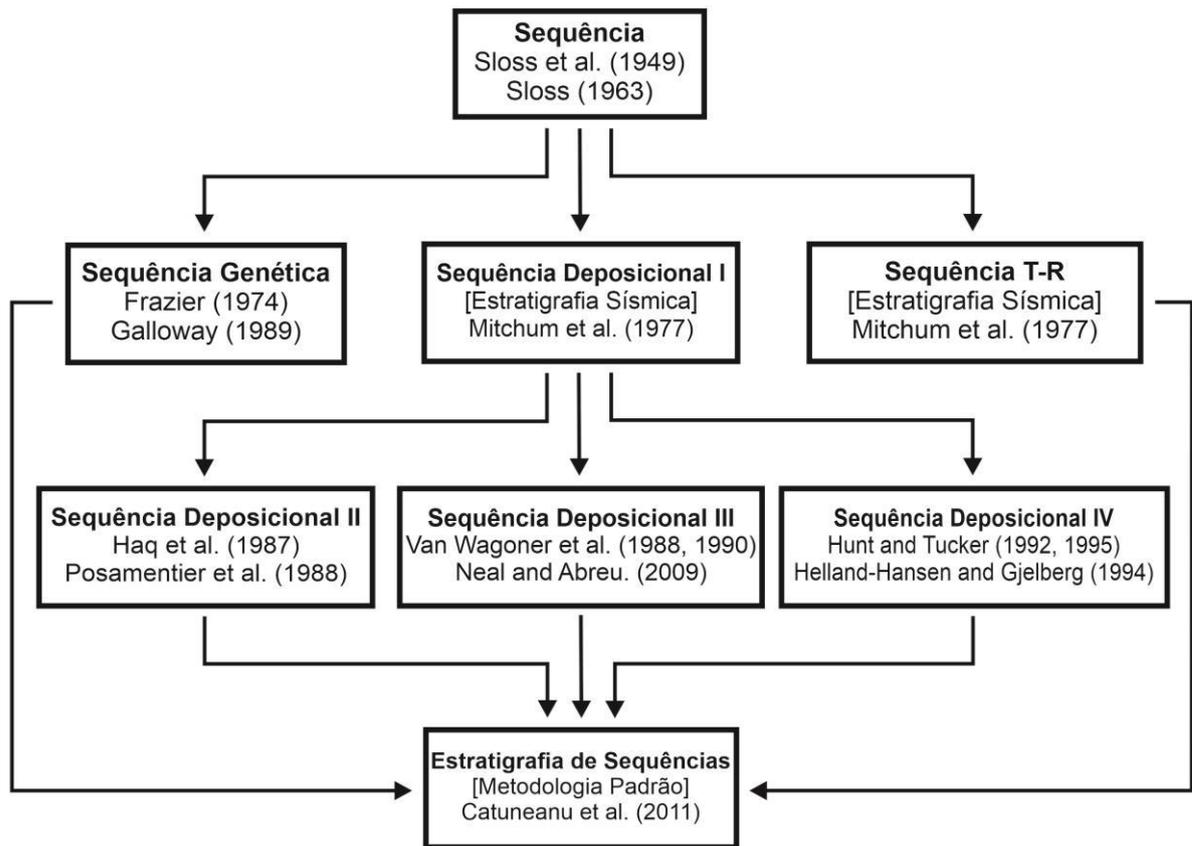
Na década de 1970, três ex-estudantes de Sloss, Peter Vail, Robert Mitchum Jr e John Sangree, os quais fizeram suas pesquisas de doutorados em depósitos periglaciais (portanto depósitos altamente influenciados por glacioeustasia) do Pensilvaniano nas sinéclise intracontinentais americanas estavam trabalhando na petroleira Exxon com bacias de margens continentais (Dott Jr, 2014). Estes geólogos aplicaram o conhecimento adquiridos com L. L. Sloss sobre Sequências Depositionais a seções sísmicas e propuseram um método de analisar

a evolução estratigráfica em bacias de margens continentais denominando-o de Sismoestratigrafia, ou Estratigrafia Sísmica.

Esta abordagem da evolução estratigráfica nada mais é do que uma análise da Estratigrafia de Sequências sobre dados sísmicos ao invés de dados de afloramentos como era feita até então. Esta abordagem, porém, avançou na conceituação original de Sloss, detalhando e introduzindo novos elementos de análise para a interpretação da Estratigrafia de Sequências, como por exemplo, a conceituação de limites de sequências, os quais para Sloss diziam respeito somente a discordâncias que representassem a exumação total da bacia. Na Sismoestratigrafia foi introduzido o conceito de “Conformidade Relativa” que significa uma linha de tempo imaginária projetada para dentro da bacia a partir de erosões que só afetaram as margens da bacia. Outros conceitos introduzidos por Vail, Mitchum Jr, Sangree e outros nas publicações do AAPG Memoir 26 de 1977 foram os “Tratos de Sistemas” e as “Superfícies Chaves” que limitam os Tratos de Sistemas e as próprias Sequências Depositionais. Para os autores citados acima a definição de Sequência Depositional é ***“uma unidade estratigráfica composta de uma sucessão relativamente concordante de estratos relacionados geneticamente limitada na base e no topo por discordâncias e suas conformidades relativa”***. Originalmente, os principais tratos de sistemas propostos foram: ***Tratos de Sistema de Mar Baixo (TSMB); Trato de Sistema Transgressivo (TST ou TT); Trato de Sistema de Mar Alto***, Vail (1987), Posamentier & Vail (1988) e Posamentier *et al.* (1988). Posteriormente a Estratigrafia de Sequências obteve a seguinte definição: ***“um tipo de estratigrafia que lida com a descrição, interpretação, classificação e nomenclatura de rochas sedimentares baseada nos seus padrões estratigráficos de empilhamento e suas relações estratigráficas”*** (Catuneanu, 2017).

Após estes trabalhos iniciais que revisaram a conceituação de Sloss sobre Sequência Depositional e definitivamente cunharam o termo Estratigrafia de Sequências, outras

diferentes formas de abordagem da Estratigrafia de Sequências foram propostas. Catuneanu (2006) e posteriormente Catuneanu (2017), em uma versão atualizada, resumiu estas abordagens em 6 (seis) tipos de Sequências Depositionais denominadas *Sequências Depositionais tipo I, II, III, IV, Sequência Genética e Sequência T-R* (Figura 11). Estas abordagens apresentam nomenclaturas diferentes para os tratos de sistemas, mas, mais que isso, quase todas elas marcam os limites das sequências em posições diferentes (Figura 12). Todavia, este autor, em uma tentativa de padronizar o jargão e as abordagens evolutivas da estratigrafia que, para cada tipo de Sequência Depositional, tem um limite diferente, propõe que existe um mecanismo dirigente para todas elas que é a **variação do nível de base na bacia**. A variação do nível de base é cíclico e obedece ao padrão gráfico de uma senoide. Em um ciclo completo o autor supracitado identificou 4 pontos chaves que segundo ele definem tanto os limites entre os tratos de sistemas como os limites de Sequências Depositionais. Estes pontos são: *início da queda do nível de base; fim da queda do nível de base; fim da regressão; fim da transgressão* (Figuras 11 e 12).



*Figura 11 - Diferentes proposições por diferentes autores para a análise da Estratigrafia de Sequências mostrados por Catuneanu (2017)*

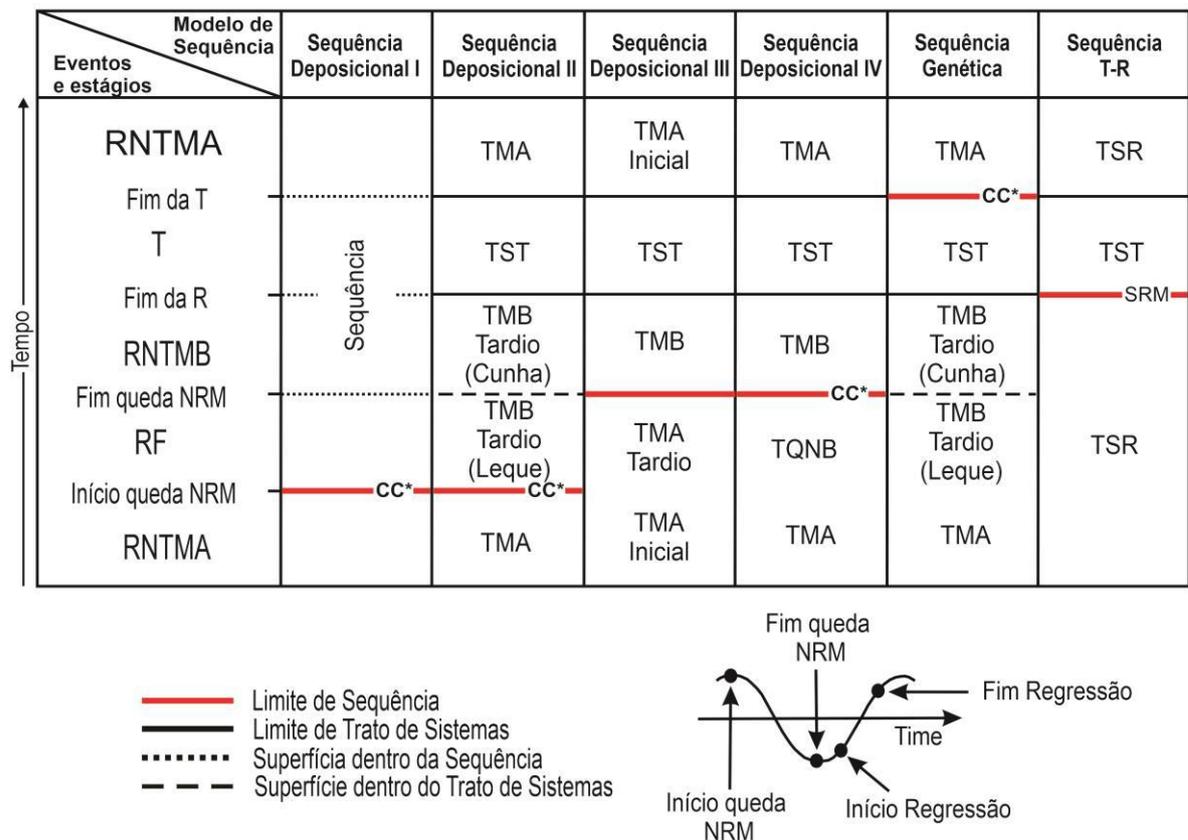


Figura 12- Nomenclatura para as diferentes proposições para a análise da Estratigrafia de Sequências como mostrados por Catuneanu (2017). CC\*: Conformidades correlative. RF: Regressão Forçada. FSST: Trato de Sistema de Queda do Nível de Base. HNR: Regressão Normal do Trato de Mar Alto. HST: Trato de Mar Alto. LNR: Regressão Normal do Trato de Mar Baixo. LST: Trato de Sistemas de Mar Baixo. MFS: Superfícies de Inundação Máxima. MRS: Superfície de Regressão Máxima. R: Regressão. RSL: Nível Relativo do Mar. RST: Trato de Sistemas Regressivo. T: Transgressão. T-R: Transgressão-Regressão. TST: Trato de Sistemas Transgressivo. Os limites de Sequências são assinalados pelas linhas vermelhas. Curva (senoide) de variação do nível de base com todas as informações relevantes.

Catuneanu (2006 e 2017) pontua que cada modelo tem seus méritos e suas limitações, portanto, nenhum deles é aplicável a todo estudo de caso, pois dependendo do ambiente tectônico e deposicional (bacias de mar aberto em margens de continente; bacias interiores do tipo sinéclise, ou *sag*; diferentes tipos de bacias riftes, etc) os Tratos de Sistemas e, por conseguinte as Sequências Depositionais serão diferentes, porém, segundo este autor, em todo tipo de ambiente tectônico e deposicional é possível se aplicar a análise da Estratigrafia de Sequências, uma vez que em todos os casos, o mecanismo dirigidor da evolução do registro deposicional é a variação cíclica através do tempo geológico do nível de base na

bacia. O caso analisado neste trabalho, a Formação Codó, por ter sido depositado em um ambiente tectônico de uma bacia tipo *sag*, ou seja, uma bacia de grandes dimensões em termos de área, mas, de pequena profundidade, segundo D'Souza (2021), e por ter como dados para análises, perfis de GR de poços da indústria do petróleo será analisada de acordo como interpretação sobre a variação de ciclos transgressivos e regressivos (T-R) como proposto por Karagodin (1975), Johnson & Murphy (1984) e Embry & Johannessen (1992), também discutido por Embry (1995, 2002).

### 3.2.1 - SEQUÊNCIAS T-R

A interpretação da evolução estratigráfica do registro sedimentar em um bacia a partir da análise dos ciclos de transgressão e regressão como decorrentes da variação cíclica do Nível de Base ficou mais conhecida a partir do trabalho de Embry & Johannessen (1992) que propuseram este método de análise como mais uma abordagem da Estratigrafia de Sequências, porém, antes disso, Karagodin (1975) e Johnson & Murphy (1984) mencionaram este tipo de análise da evolução do registro sedimentar sem entretanto considera-lo como mais uma abordagem da Estratigrafia de Sequências, mesmo porque em 1975 quando o russo Yu Karagodin fez a proposição original desta ferramenta de análise, a Estratigrafia de Sequências em sua versão moderna ainda não tinha sido lançada. Após o trabalho de 1992, Embry (2002) fez uma atualização dos conceitos e dos métodos de análise consolidando esta forma de abordagem da Estratigrafia de Sequências preferencialmente para bacias sedimentares cuja a geometria do seu substrato seja do tipo rampa e cujo os dados para a análise sejam oriundos de descrições de empilhamento vertical de litofácies. Estes dados podem ser resultados de trabalho de campo, mas, aplicam-se muito bem para a análise da variação vertical de eletrofácies como *proxy* de empilhamento vertical de litofácies feitas em perfis de GR, os quais são os métodos e os dados usados neste trabalho.

Fundamentalmente o que Embry & Johannessen (1992) propuseram e posteriormente Embry (2002) revisou foi que um ciclo de variação do Nível de Base em uma bacia sedimentar define uma Sequência Depositional com apenas 2 (dois) Tratos de Sistemas, quais sejam, o Trato de Sistema Transgressivo e o Trato de Sistemas Regressivo. Segundo estes autores, os limites de sequências estão posicionados, na curva senoidal que define a variação do Nível de Base, no final da Regressão do registro sedimentar, sendo este o momento de exposição máxima do registro sedimentar em uma bacia, portanto, o momento que define a discordância que limita as sequências deposicionais (Figura 13)



Figura 13- Curva senoidal que representa idealmente a variação do Nível de Base em uma bacia sedimentar. Todas as informações relevantes estão contidas na figura. Modificada de Catuneanu (2006 e 2017)

Para Embry (2002), as sequências T-R é definido por como uma sequência formada por uma discordância subaérea ou uma superfície de ravinamento para a porção discordante do limite de sequência e por uma Superfície de Regressão Máxima (SRM) para a porção conformante do limite de sequência. Embry (op. cit.) defende o uso desse modelo de sequência por ser o único modelo atendendo a todos os critérios de praticidade e utilidade, já que uma sequência T-R é limitada por superfícies estratigráficas objetivamente reconhecíveis.

De acordo com este modelo de Sequência Depositional, o Trato de Sistemas Transgressivo é limitado em sua base pela superfície de regressão máxima e em seu topo pela superfície de inundação máxima, indicando assim segundo que esse trato é formado durante a

subida do nível de base, quando a taxa de criação de espaço supera a taxa de aporte sedimentar, sendo a superfície de regressão máxima caracterizada pela mudanças de estratos de depósitos rasos para estratos de depósitos profundos, caracterizando, desta forma, uma deposição em regime retrogradacional (Holz, 2012).

No início da transgressão, a ação das ondas remove sedimentos da linha de costa da bacia causando o ravinamento das regiões mais rasas para mais fundas, criando contatos erosivos definidos como superfície de ravinamento. O final da transgressão é um ponto imaginário na senoide de variação do nível de base a partir do qual a taxa de input sedimentar para dentro da bacia suplanta a taxa de geração de espaço para a deposição ocorrendo progradação, ou regressão normal da linha de costa. Este ponto de inflexão é denominado de Superfície de Transgressão Máxima ou Superfície (SRM) de Inundação Máxima (SIM) (Embry, 2002).

O Trato de Sistemas Regressivo é limitado na base pela Superfície de Inundação Máxima, e no topo pela Superfície de Regressão Máxima, sendo este também, o limite de sequência para o modelo de sequências T-R (figura ww). Esse trato se forma inicialmente, entre o fim da transgressão e início da queda do Nível de Base por depósitos relacionados a regressão normal da linha de costa, como, por exemplo, depósitos deltaicos. A partir do ponto de inflexão que marca o início da queda do Nível de Base, a linha de costa regride de forma forçada e os depósitos que passam a dominar a bacia na sua porção emersa dão depósitos fluviais, ou flúvio-eólicos-lagunares, as vezes podendo ocorrer depósitos evaporíticos, isso a depender das condições climáticas reinantes na bacia. No final da queda do Nível de Base, quando a inflexão da curva se inverte novamente e este começa a subir, a taxa de input sedimentar para dentro da bacia ainda é maior que a taxa de subida do Nível de Base, ocorrendo, portando um pouco mais de regressão da linha de costa, só que, desta feita, de forma normal, por progradação.

Quando se trata de uma bacia de interior de continente, do tipo SAG, como é o caso de estudo deste trabalho, o ponto de regressão máxima pode inclusive representar o assoreamento e a exposição total do registro previamente depositado e a bacia ser dominada por processos erosivos subaéreos, como fluviais, eólicos e pedogenéticos, levando à formação de discordância subaérea, evidenciando assim uma interrupção na sedimentação e resultando em um contato erosivo abrupto com depósitos posteriores (Holz, 2012).

## 4.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 - Materiais

Para esse trabalho foram utilizados 14 poços requeridos na Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), dos foram utilizados as curvas dos perfis de raios gama e os dados de descrições litológicas disponíveis nos perfis compostos quanto nos relatórios dos poço (Arquivo Geral de Poços).

### 4.2 - Métodos (Fluxo de trabalho)

Nesse trabalho foi feita a interpretação da evolução estratigráfica da Formação Codó, utilizando perfis de raios gama e descrições litológicas adquiridos em poços perfurados pela indústria petrolífera na porção norte da Bacia do Parnaíba e na Bacia de São Luís. Esse trabalho se dividiu em quatro etapas: (1) escolha dos poços junto a ANP; (2) controle de qualidade e edições diversas no software CorelDraw; (3) identificação de eletrofácies e eletrossequências em cada poço; e (4) correlação de poços, que serão descritas a seguir.



Figura 14: Fluxograma de trabalho.

#### 4.2.1 – SELEÇÃO DE POÇOS

A seleção dos poços buscou fazer uma amostragem representativa do objeto de análise deste trabalho, qual seja, a Formação Codó, na área de estudo. Por razões relacionadas aos objetivos exploratórios das empresas petrolíferas, os poços perfurados nas bacias sedimentares encontram-se concentrados em certas áreas decorrentes do(s) sistema(s) petrolífero(s) da bacia, não tendo portanto uma distribuição sistemática e equidistante na

bacia. No caso da área de estudo existe uma concentração de poços perfurados na porção noroeste desta, ou seja, na bacia de São Luís, e outra na porção sudoeste, na bacia do Parnaíba. Todavia, existem alguns poços entre estas duas concentrações que permitiram se fazer uma correlação através de toda a área de estudo sem prejuízos metodológicos e sem comprometer os resultados do trabalho. Na porção sudeste da área de estudo também foi possível fazer correlação entre 4 poços dispostos no sentido SW-NE.

A seleção de poços para esta pesquisa resultou em uma integração e correlação de dados em escala bacinal (considerando a área de ocorrência da Formação Codó nas duas bacias citada) até o momento ainda não apresentado para esta bacia, daí o caráter inédito deste trabalho. Todos os trabalhos relacionados ao tema normalmente são executados em escala de afloramento, ou pontualmente em poucos poços, portanto, estes trabalhos apesar de serem bastante detalhados, são localizados e representam apenas uma porção específica da bacia. Diferentemente, a análise executada neste trabalho, apesar de não ter o nível de detalhes daqueles trabalhos que focaram em análises de fácies e/ou microfácies sedimentares, apresenta uma interpretação em escala regional para toda a bacia.

#### 4.2.2 – CONTROLE DE QUALIDADE

Após o recebimento dos dados, foi feito o controle de qualidade, que se dividiu em algumas etapas. Primeiro foram identificados quais poços continham os dados necessários para a análise e quais não teriam dados suficientes. Com os poços já identificados, os dados foram carregados no software CorelDraw, onde foram eliminados os dados que não seriam necessários e feitas algumas edições nos dados, que facilitaram as análises. Também foi verificado no processo de controle de qualidade, que constou de um “*crosscheck*” entre as curvas dos perfis, as descrições litológicas (AGP) e a litologia interpretada, que, em alguns casos, seria necessária uma reinterpretação da coluna litológica interpretada originalmente nos

perfis compostos uma vez que a litologia interpretada não mostrava coerência com as curvas dos perfis nem com a descrição das amostras de calha, ou amostras laterais, ou testemunhos.

#### 4.2.3 - DEFINIÇÃO DE BASE E TOPO DO OBJETO DE ANÁLISE (FORMAÇÃO CODÓ)

O primeiro passo no fluxo de trabalho desta pesquisa foi a definição da base e do topo da Formação Codó em cada um dos poços analisados. Como os poços analisados (aparte dos dois poços do projeto da Bacia do Parnaíba) são todos oriundos da indústria petrolífera, a maioria deles continha informação sobre as bases e os topos da Formação Codó, porém, como sabido, o foco dos poços da indústria são formações mais antigas em maiores profundidades. As formações rasas, até mesmo por possuírem muito menos dados para análise, possuem baixa acuracidade na definição de seus topos e base. Assim sendo, o critério usado neste trabalho foi considerar como base e topo para a formação Codó aqueles marcados pelo grupo da Geologia Sedimentar do Projeto Alagoas que descreveu os testemunhos dos poços perfurados no projeto. Neste caso específico foram usados topo e base da Formação Codó como definidos para o Poço 2-CO-1-MA.

É importante realçar que o poço 2-CO-1-MA é gêmeo de dois poços perfurados pela indústria: 1-OGX-96-MA e 5-OGX-103-MA. Desta forma, os perfis corridos nos 3 poços foram emendados (*merge*) no software TechLog<sup>TM</sup> (Licença acadêmica cedida pela empresa Schlumberger) resultando em uma única curva do perfil de GR. Em seguida, topo e base da Formação Codó como definidos com base em descrição de testemunhos pelo grupo da Geologia Sedimentar do Projeto Alagoas foram transpostos para o perfil de GR do poço 2-CO-1-MA e de seus gêmeos. Uma vez feito isso, foram analisados os padrões de eletrofácies à Formação Codó e, por similaridade, topos e bases desta formação foram marcados em outros perfis. Em alguns casos os topos e bases coincidiram, ou estavam bem próximos daqueles marcados nos perfis compostos dos poços da indústria, mas em outros casos, não.

Além do poço 2-CO-1-MA e seus gêmeos, outro poço considerado chave para a interpretação de topo e base da Formação Codó foi o poço 2-ANP-5-MA. Este poço foi perfurado dentro do rifte de São Luís portanto possui uma espessa seção sedimentar da Formação Itapecuru sobreposta à Formação Codó. Os topo e base da Formação Codó neste poço, marcados pelo critério definido neste trabalho (reportado acima), foram praticamente nas mesmas posições daqueles marcados pela indústria baseados tão somente em padrões de perfis e em descrição de amostras de calha que possuem acuracidade muito mais baixa que descrição de testemunhos como performada no poço 2-CO-1-MA. Como este trabalho foi feito com base em padrões de variações das curvas de GR, ou seja, padrões de eletrofácies, o poço 2-ANP-5-MA foi considerado chave para este trabalho porque ele mostra muito claramente padrões bem distintos de eletrofácies para as formações Codó e aquelas soto e sobrepostas a esta (Figura 15).

#### 4.2.4- IDENTIFICAÇÃO DE ELETROFÁCIES E ELETROSSEQUÊNCIAS

Definidas as bases e os topos da Fm. Codó em cada um dos poços analisados passou-se a fase de analisar internamente a esta os padrões das curvas de GR, ou seja, a análise de eletrofácies no empilhamento sedimentar da Formação Codó de acordo com os critérios definidos por Rider (2002).

Essa análise foi feita para cada poço em particular definindo-se, portanto, os padrões de eletrofácies nestas situações pontuais (poços). Todavia, para se partir de uma análise de eletrofácies, a qual pode ser feita tão somente e um único poço, posto que a mesma tem caráter somente descritivo, para uma análise de eletrossequências que representam eventos em escala de bacias, portanto, de caráter interpretativo, é necessário analisar uma gama de dados com distribuição areal que seja representativa da bacia. Em um único poço é possível se definir eletrofácies, mas não é possível definir eletrossequências. Em um único poço a

variação vertical de fácies pode até ser decorrente de eventos alocíclicos, que definem uma sequência deposicional, porém, podem também ser apenas resultados de eventos autocíclicos que não definem eventos em escala de bacias. Daí a necessidade de se ter uma gama de dados suficiente para se avaliar as variações verticais de fácies em escala bacinal. Como já demonstrado anteriormente os dados trabalhados nesta pesquisa permitem analisar eventos em escala de bacia, ou seja, permitem, além da descrição de eletrofácies, uma interpretação sobre sequências deposicionais que representam a história evolutiva do intervalo que se está analisando, no caso, a Formação Codó.

Como já discutido anteriormente nos Referenciais Teóricos, Rider (2002) propõe que em uma sucessão vertical de eletrofácies o “pico” de máximo valor lido pelo perfil de GR seja considerado como a Superfície de Inundação Máxima e, o inverso, ou seja, o “pico” de menor valor lido pelo perfil de GR seja considerado como a Superfície de Regressão Máxima. Desta forma, relacionando os dados e informações retiradas dos perfis elétricos com os conceitos de Estratigrafia de Sequências baseada no desenvolvimento de ciclos transgressivos e regressivos (Embry, 2002) foram definidos os tratos de sistema, e com isso, as sequências deposicionais que compõem a evolução estratigráfica da Formação Codó.

## 5.0- RESULTADOS

Os principais resultados apresentados neste trabalho são:

- (1) Redefinição dos topos e bases da Formação Codó nos poços analisados tomando como referência inicial o topo e a base da Formação Codó como definido na descrição de testemunhos no poço 2-CO-1-MA.
- (2) Definição do padrão geral de eletrofácies das Formações Codó e Itapecuru.
- (3) Definição do padrão de eletrofácies internas da Formação Codó obedecendo os padrões de sino e funil como proposto por Rider (2002) para cada um dos 14 poços analisados neste trabalho.
- (4) Seções estratigráficas em escala bacinal feitas a partir das correlações dos padrões de eletrofácies em cada um dos poços analisados
- (5) Modelo evolutivo para a Formação Codó.

## 5.1- Tabela de Redefinição de Topos e Bases da Formação Codó nos Poços Analisados neste Trabalho

Tabela 1: Tabela com topos reinterpretados da Fm. Codó

	Fm. Codó - Topo			Fm. Codó - Base		
	Profundidade		Cota Projeto Alagoas	Profundidade		Cota Projeto Alagoas
	Projeto Alagoas	Perfil Composto		Projeto Alagoas	Perfil Composto	
2-PR-1-MA	1462	1455	-1412	1596	1596	-1546
2-ANP-5-MA	2460	2459	-2415	2630	2630	-2585
1-RPR-1-MA	562	X	-535	716	X	-689
1-IV-1-MA	1163	1207	-1119	1323	1323	-1279
1-AT-1-MA	517	518	-487	649	665	-619
1-CI-1-MA	709	729	-651	882	882	-824
9-PAF-3-MA	601	602	-586	745	757	-730
1-OGX-59-MA	241	96	-217	269	269	-245
1-OGX-107-MA / TRIZIDELA	164	72	-127	213	211	-174
3-OGX-38-MA	25	17	86	115	115	-4
1-OGX-101-MA	31	31	90	107	147	14
2-BAC-1-MA	150	102	67	277	277	-60
1-OGX-102-MA	45	18	-161	146	205	-30
1-OGX-96-MA / COROATÁ	83	21	-27	234	234	-178

## 5.2 - Definição do padrão geral de eletrofácies das Formações Codó e Itapecuru

Como já relatado no item Materiais e Métodos, o poço 2-CO-1-MA foi tomado como referência para a definição do topo da Formação Codó posto que este foi marcado como resultado de detalhada descrição de litofácies feitas no testemunho do poço pelo grupo de Geologia Sedimentar do Projeto Alagoas. Porém, ao se transferir as “informações das rochas” para o perfil de GR do poço analisado (2-CO-1-MA) e deste para os outros poços analisados neste trabalho, localizados a dezenas ou mesmo centenas de quilômetros do poço 2-CO-1-MA, foi necessário o estabelecimento de um limite bem definido de eletrofácies para marcar o topo da Fm. Codó/base da Fm. Itapecuru. O método para tanto, como já reportado no item Materiais e Métodos foi: (1) marcação da base e do topo da Fm. Codó no poço 2-CO-1-MA como definido pela grupo da Geologia Sedimentar do Projeto Alagoas; (2) Análise do padrão de eletrofácies internas à Fm. Codó; (3) Escolha de um poço o mais distante possível do poço 2-CO-1-MA em que a Fm. Itapecuru fosse bem desenvolvida. Poço escolhido: 2-ANP-5-MA; (4) Interpretação, por similaridade deste com o poço 2-CO-1-MA, dos padrões eletrofácies

internas da Fm. Codó e consequente marcação do topo e da base desta formação; (5) Após marcação do topo da Fm. Codó no poço ANP-5, comparação dos padrões de eletrofácies das formações Codó e Itapecuru. Resultado mostrado na figura 14; (6) Verificação se o padrão de eletrofácies das Fm. Codó nos outros poços analisados neste trabalho.

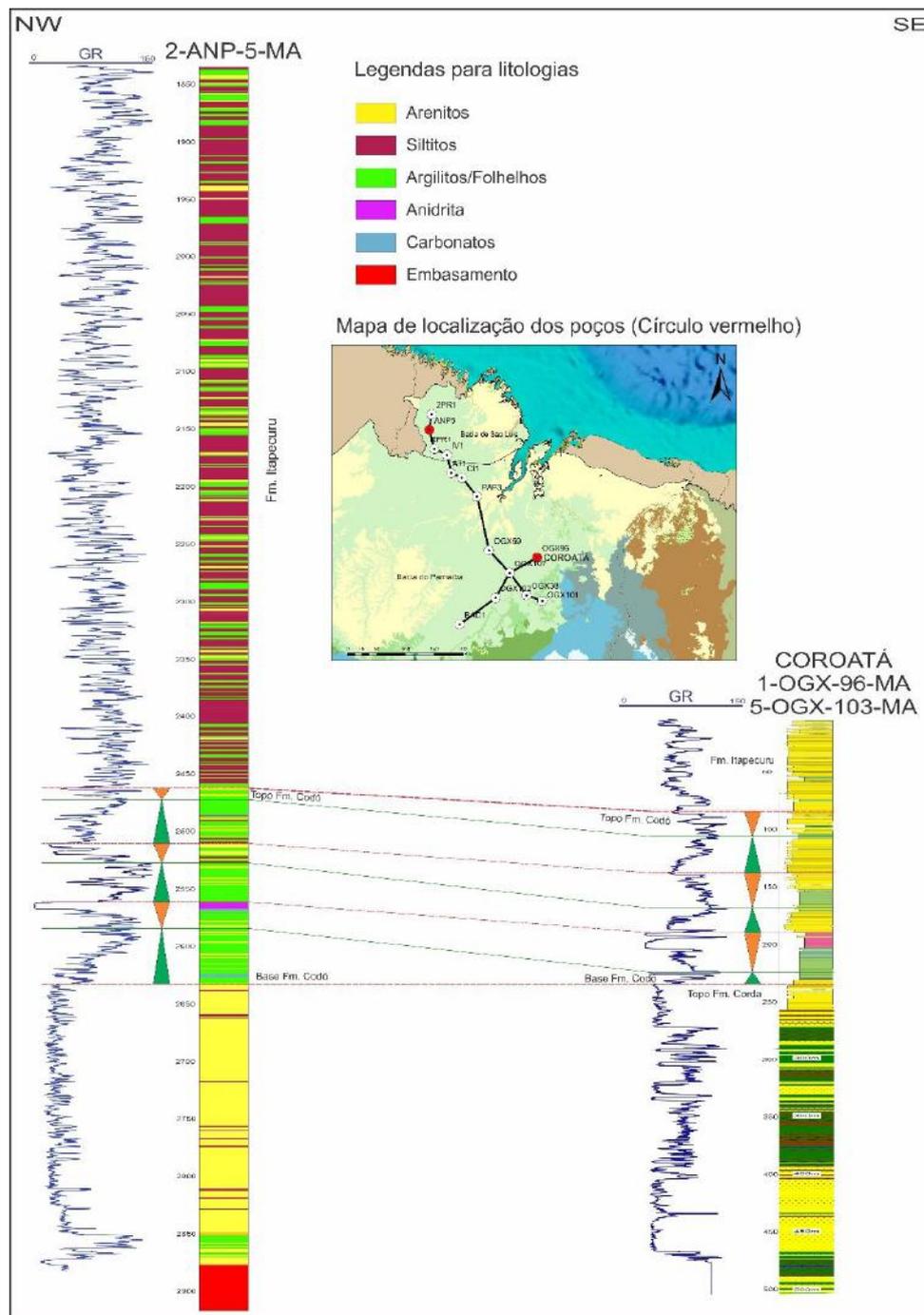


Figura 15- Colunas litológicas e curvas de GR dos poços 2-CO-1-MA e ANP-5. Os dois poços estão distantes 275 km em linha reta. Em destaque a Formação Codó nos dois poços com base e topo marcados a partir do poço 2-CO-1-MA e com padrões de eletrofácies

*internas. No poço ANP-5 observa-se o padrão muito distinto das eletrofácies das Fms Codó e Itapecuru.*

A figura 15 mostra os poços 2-CO-1-MA e ANP-5, distantes entre si em cerca de 275 km. A Fm. Codó nos 2 (dois) poços encontra-se em destaque já com as eletrofácies que representam os ciclos transgressivos e regressivos marcados. Notar que no poço 2-CO-1-MA a Fm. Codó encontra-se sobreposta à Fm. Corda, já no poço ANP-5, sobre a Fm. Grajaú. Apesar de este não ser o foco deste trabalho, mas do projeto em que este trabalho faz parte, foi interpretado que não ocorre a Fm. Grajaú na porção SE da área de ocorrência dos depósitos cretáceos na bacia do Parnaíba, esta formação é mais presente na porção oeste da área, quadrantes SW e NW.

O poço ANP-5 foi perfurado dentro do rifte de São Luís, daí porque a espessa seção da Fm. Itapecuru acima da Fm. Codó. Importante pontuar que o poço não está todo representado nesta figura, quase 2000 m de seção foram cortados com o objetivo da figura ficar mais apresentável. A intenção de se mostrar parte da Fm. Itapecuru neste poço, nesta figura, é para evidenciar o seu padrão de eletrofácies muito distinto do padrão de eletrofácies da Fm Codó, sotoposta. **Foi esta marcante diferença de padrões de eletrofácies entre as formações Codó e Itapecuru que norteou a marcação do topo da Fm. Codó nos outros poços analisados neste trabalho.**

Ao se comparar os poços 2-CO-1-MA e ANP-5 percebeu-se que os padrões de eletrofácies da Fm. Codó nos dois poços é bastante semelhante, apesar da distância de centenas de quilômetros entre eles. Outra observação importante nestes dois poços é que a espessura da Fm. Codó varia muito pouco mesmo à distância de centenas de quilômetros. Estas questões serão discutidas mais à frente no item Discussão.

### **5.3 - Definição do padrão de eletrofácies internas da Formação Codó em todos os poços analisados neste trabalho e correlação estratigráfica das transects NW-SE e SW-NE.**

Depois de feita a correlação entre os poços mostrados anteriormente com o objetivo de definir base e topo da Fm. Codó, procedeu-se a análise detalhada das eletrofácies da Fm. Codó em cada um dos poços como mostrada a seguir culminando com a correlação estratigráfica entre os poços para a montagens das seções regionais NW-SE e SW-NE (transects).

#### **5.3.1- POÇO 1-OGX-96-MA / 2-CO-1-MA (MODELO PARA A INTERPRETAÇÃO)**

A partir da base, a Fm. Codó nesse poço mostra um rápido crescimento, apesar de intercalado, nos valores de GR definindo um claro padrão de sino o que indica um afinamento granulométrico e aumento de argilosidade para o topo até atingir o pico de máxima leitura do GR. Este padrão foi interpretado como consequência de um afogamento da bacia, portanto um ciclo transgressivo com a superfície de inundação máxima marcada no pico de GR. Este primeiro ciclo transgressivo tem aproximadamente 10 m de espessura.

Em seguida, há a mudança para a tendência de diminuição dos valores de Raios Gama, o que evidencia a diminuição da argilosidade desse intervalo, que vai até o topo da deposição de anidrita definindo um claro padrão de funil. Este padrão de funil no perfil de GR, segundo Rider (2002) pode ser interpretado como um ciclo de raseamento da bacia, ou seja, um ciclo regressivo culminando com a superfície de regressão máxima marcada no topo dos evaporitos (anidrita). Neste poço este ciclo tem 34 m de espessura.

Após atingir os valores mínimos na anidrita, o GR começa a subir novamente até atingir o máximo definindo outro padrão em sino possibilitando a interpretação de outro ciclo transgressivo com superfície de inundação máxima marcada 21 m acima da superfície de regressão máxima anterior.

Mais uma vez os valores no perfil de GR voltam a diminuir, formando outro padrão em funil como consequência do aumento da granulometria e diminuição de argilosidade para o topo, permitindo, portanto, a interpretação de outro ciclo regressivo com aproximadamente 31 m de espessura.

Os valores do perfil de GR novamente aumentam, definindo outro padrão em sino, o que indica que mais uma vez ocorre o aumento na argilosidade na bacia sugerindo um afogamento da mesma, ou seja, a ocorrência de um ciclo transgressivo. Este ciclo culminou com a superfície de transgressão máxima acontecendo cerca de 32 m acima da superfície de regressão máxima anterior.

Novamente os valores de GR voltam a diminuir definindo mais um padrão de funil que representa outro ciclo regressivo até o topo da Fm. Codó como marcado pela descrição de testemunho. Este último ciclo regressivo tem espessura de aproximadamente 22m.

Este mesmo tipo de interpretação foi feita para todos os outros poços analisados neste trabalho. Para não ficar repetitiva esta descrição não será colocada em forma de texto, porém as imagens de todos os poços analisados serão amostradas.

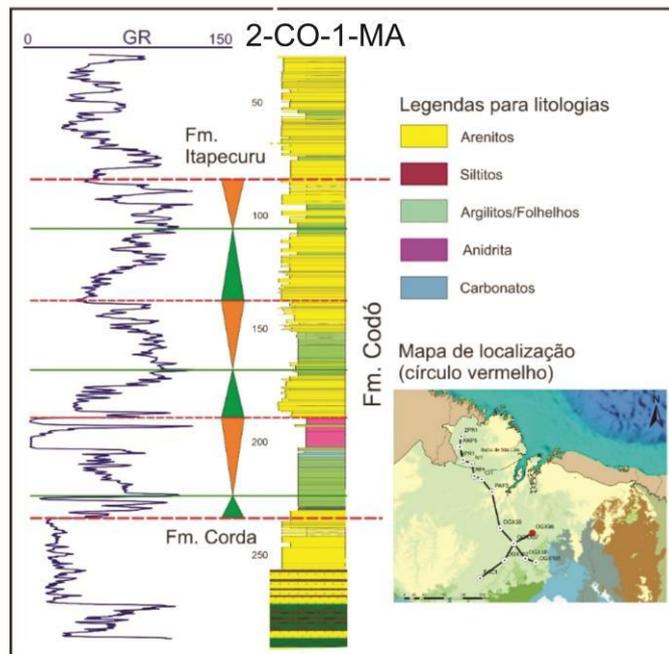


Figura 16 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-CO-1-MA

### 5.3.2- INTERPRETAÇÃO DOS CICLOS T-R NOS POÇOS DA TRANSSECT 1 (NW-SE)

#### 5.3.2.1- POÇO 2-ANP-5-MA

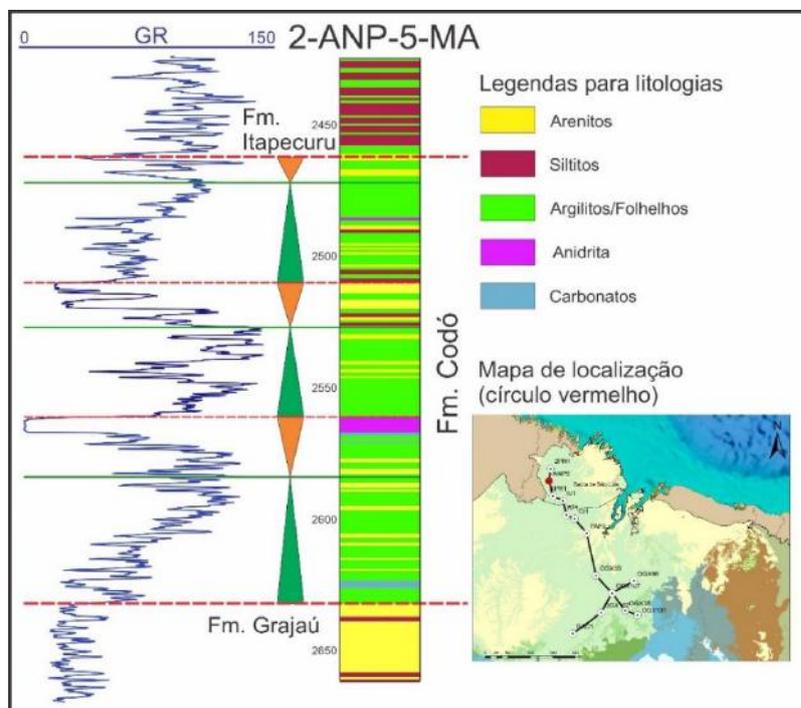


Figura 17 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-ANP-5-MA

## 5.3.2.2- POÇO 2-PR-1-MA

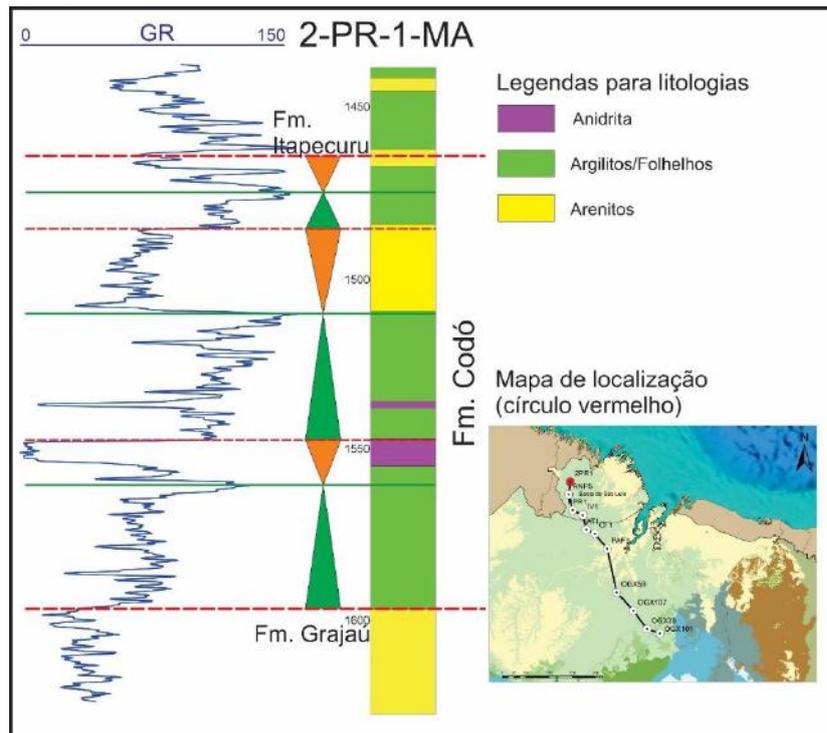


Figura 18 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-PR-1-MA

## 5.3.2.3- POÇO 1-RPR-1-MA

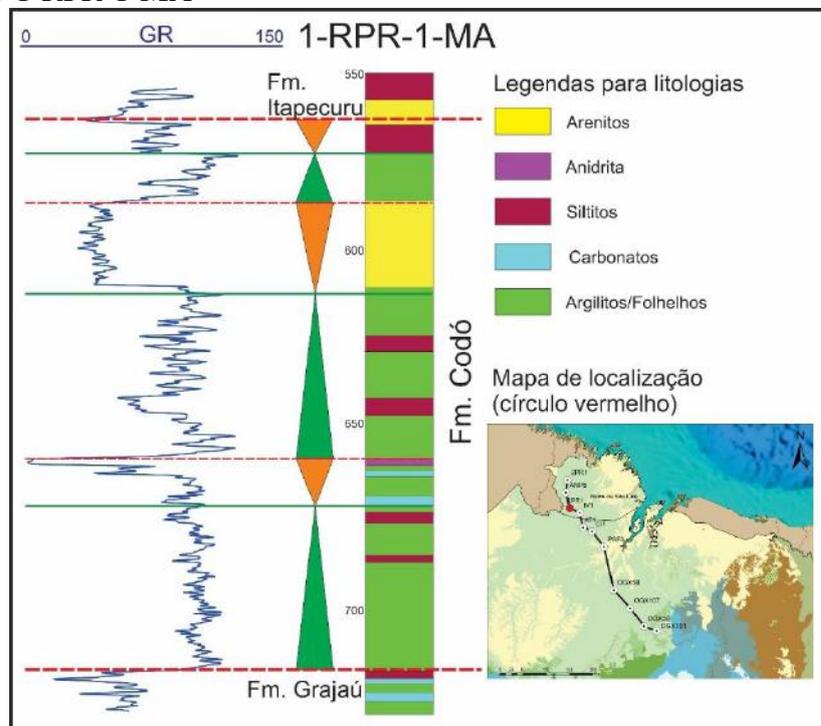


Figura 19 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-RPR-1-MA

## 5.3.2.4- POÇO 1-IV-1-MA

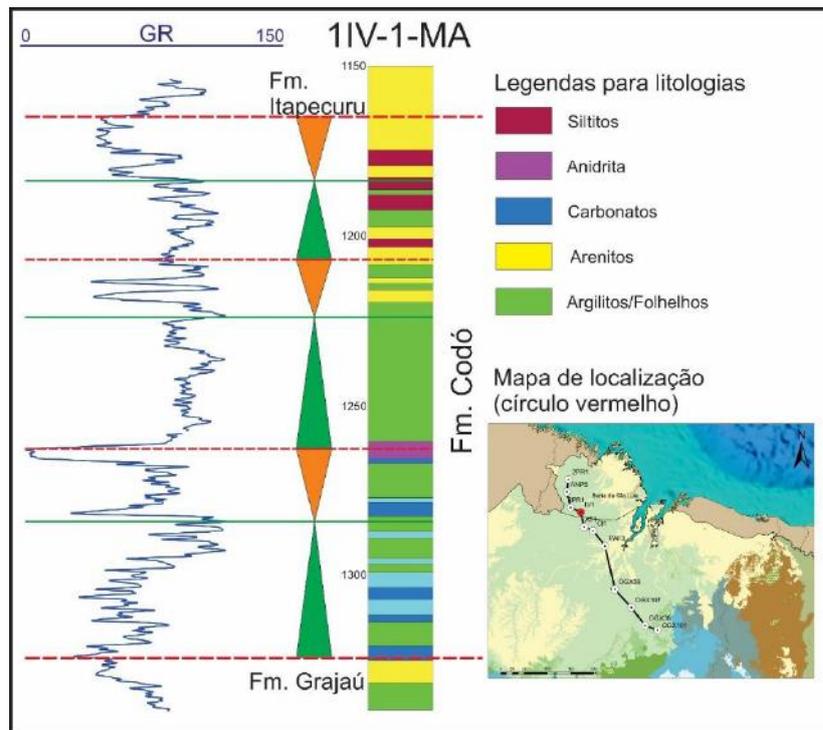


Figura 20 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-IV-1-MA

## 5.3.2.5- POÇO 1-CI-1-MA

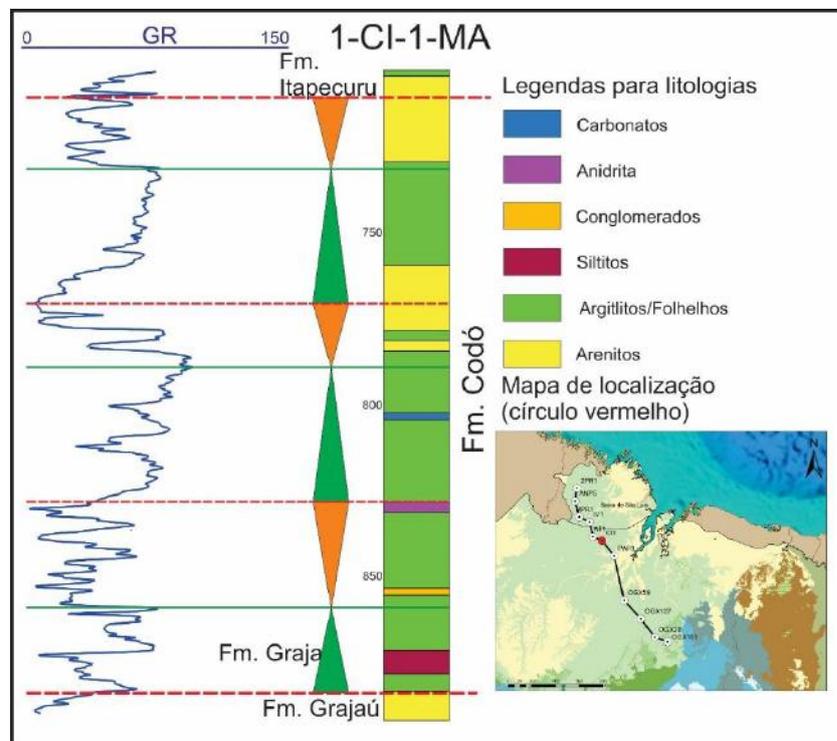


Figura 21 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-CI-1-MA

## 5.3.2.6- POÇO 9-PAF-3-MA

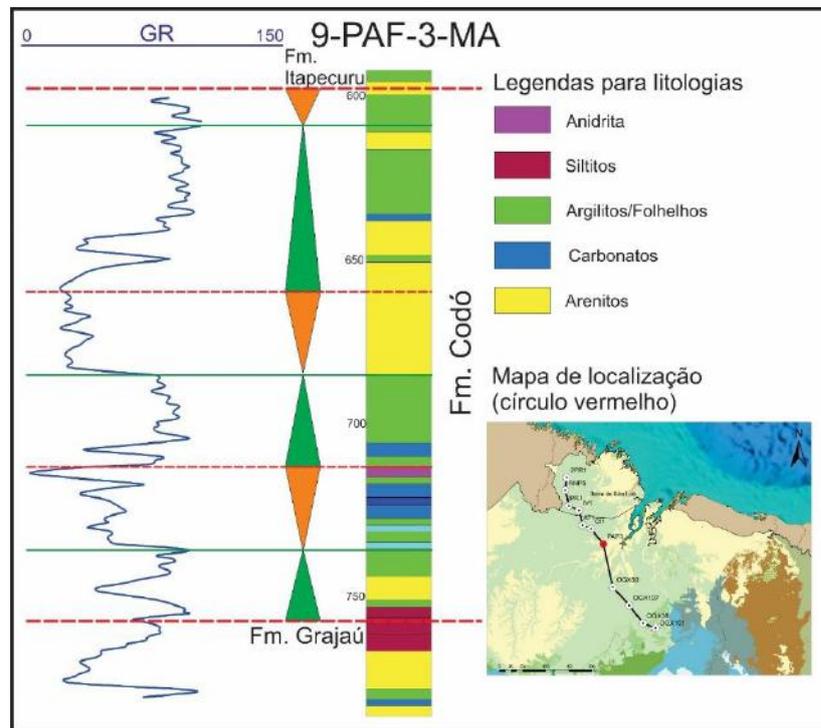


Figura 22 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 9-PAF-3-MA

## 5.3.2.7- Poço 1-OGX-107-MA / 2-TV-1-MA

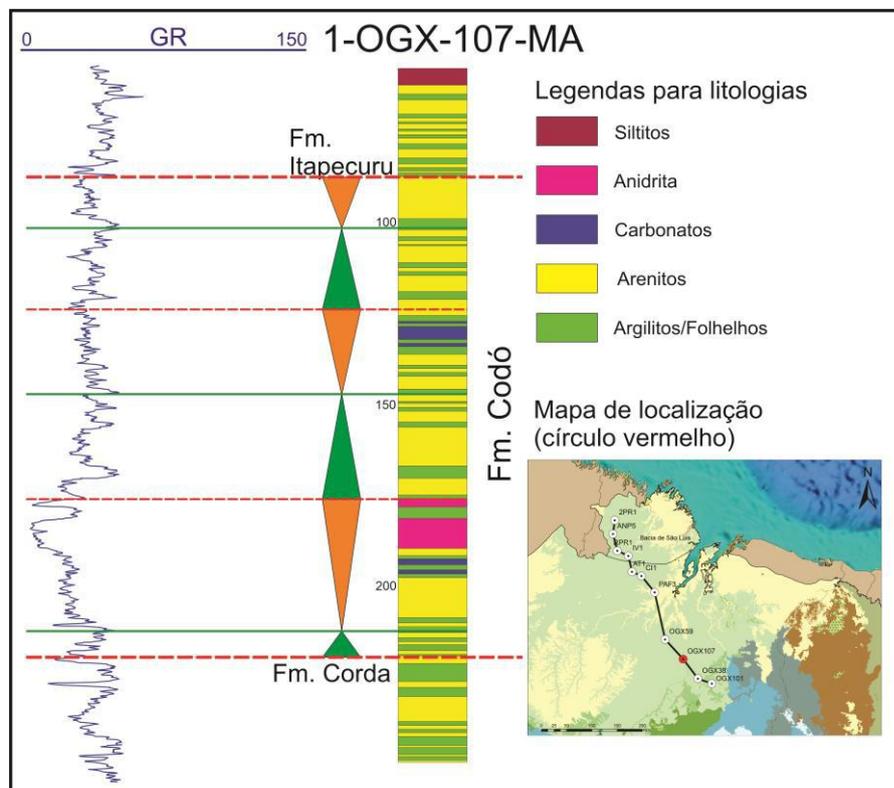


Figura 23 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-107-MA

### 5.3.2.8- POÇO 1-OGX-59-MA

O poço 1-OGX-59-MA (Figura 24) é um daqueles onde o padrão de eletrofácies é completamente diferente daquilo que foi interpretado nos poços anteriores. A primeira observação importante neste poço é que ele não apresenta anidrita na Fm. Codó. Os dois poços mais próximos a ele (PAF-9, à NW e OGX-107, à SE) na seção apresentada neste trabalho possuem depósitos de anidrita na Fm. Codó e também possuem o padrão de eletrofácies que permitiu a interpretação dos ciclos transgressivos e regressivos (ver figuras 22 e 23). Dada ao padrão anômalo de eletrofácies (quando comparado com os outros poços analisados) buscou-se suporte na sísmica para tentar alguma explicação para o fato a partir de uma observação bidimensional (seção sísmica), uma vez que o poço permite apenas uma situação unidimensional.

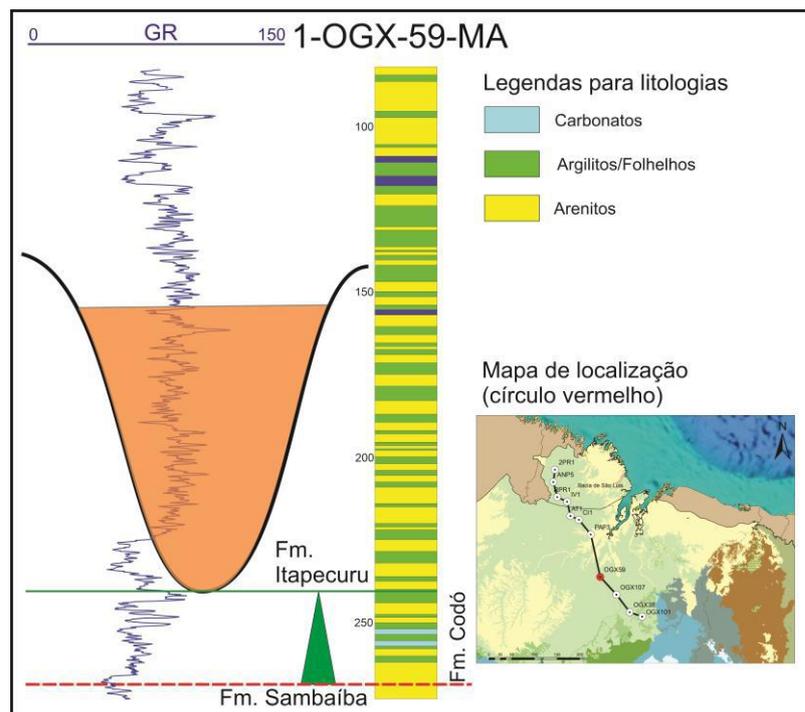


Figura 24 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-59-MA.

A figura 25 mostra a seção sísmica 303-017 de orientação W-E sobre a qual foi dada a localização OGX-59. O horizonte referente à anidrita da Fm. Codó (amarelo) foi mapeado nesta

seção sísmica por cruzamento com outras seções onde ele está muito bem caracterizado. Nota-se que este horizonte está bastante seccionado, em alguns casos percebe-se que o seccionamento é abrupto, característico de truncamento erosional. Nos detalhes da seção sísmica, pode-se ver que exatamente onde foi perfurado o poço OGX-59 é uma área de inexistência do horizonte sísmico da anidrita Codó. Neste caso, vê-se um abrupto seccionamento do horizonte à esquerda e um ténues seccionamento à direita. O imageamento sísmico, como observado nos detalhes permitiu a identificação de uma incisão erosiva interpretada como um possível canal fluvial. Na seção sísmica não fica claro o ponto exato de onde teria partido a incisão. Neste caso, usou-se o padrão de eletrofácies do perfil para se fazer a interpretação.

A partir da base da Fm. Codó foi interpretado um padrão em sino das eletrofácies o qual tem sido usado para a interpretação de ciclos transgressivos. Acima do pico de valor máximo de GR, observa-se um padrão abrupto de funil com litologia dominada por arenitos. Este padrão de funil poderia ter sido interpretado como um ciclo regressivo, porém, não foi essa a interpretação. O padrão de eletrofácies acima do intervalo rico em arenitos (de acordo com a descrição litológica) é muito semelhante ao padrão de eletrofácies da Fm. Itapecuru, ou seja, o perfil de GR mostra uma variação “nervosa” entre altos e baixos característicos de depósitos heterolíticos, como são descritos os depósitos da Fm. Itapecuru no poço COROATÁ pelo grupo da Geologia Sedimentar do Projeto Alagoas.

Com base nestas premissas a interpretação dada neste trabalho é que a incisão erosival partiu desde a formação Itapecuru, portanto pós-deposicional à toda Fm. Codó. A porção basal, mais arenos, foi interpretada como depósitos propriamente fluviais contemporâneos ao desenvolvimento do canal. Estes foram sobrepostos por depósitos heterolíticos tardios da Fm. Itapecuru.

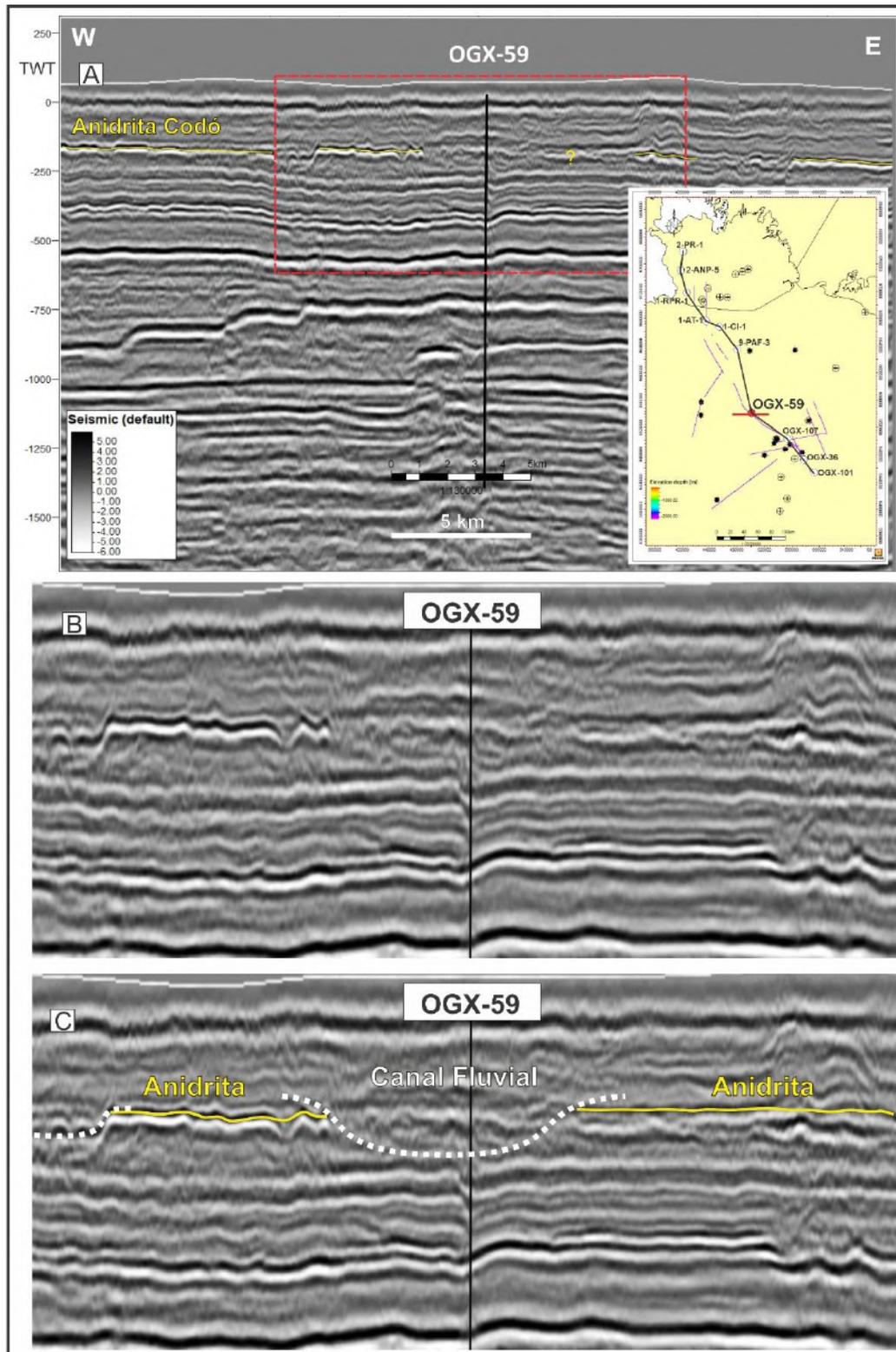


Figura 25 – Seção sísmica 303-017 sobre a qual dada a localização 1-OGX-59-MA. A) Seção sísmica inteira com o poço posicionado e o horizonte da anidrita Codó interpretado em amarelo. O mapa de localização mostra além da seção e do poço em questão (vermelho), os outros poços que compõem a transect NW-SE apresentada neste trabalho. B) Detalhe da seção sísmica sem interpretação. C) Detalhe da seção sísmica com interpretação. Demais informações relevantes estão contidas na figura.

### 5.3.2.9- POÇO 1-AT-1-MA

Ao contrário do poço 1-OGX-59-MA, este poço apresenta a primeira sequência deposicional bem definida terminando com espessa camada de anidrita. Porém observou-se que a seção de rochas argilosas (folhelhos/argilitos) que compõem tanto o segundo quanto o terceiro ciclos transgressivos é bem mais delgada que todos os outros poços onde as eletrofácies são bem definidas. Também ao contrário dos outros poços, a seção de rochas arenosas do segundo ciclo regressivo é mais espessa que nos demais poços, já a seção arenosa do terceiro ciclo regressivo é delgada, porém, logo acima aparece o padrão de GR típico da Fm. Itapecuru.

A interpretação dada neste caso é que tanto o segundo, quanto o terceiro ciclo regressivo são representados, neste poço por depósitos de preenchimentos de canais, os quais são a exceção em sistemas fluviais entrelaçados. Porém, mesmo sendo mais incipientes que o padrão, não foram tão incipientes como o canal interpretado no poço OGX-59, o qual, como demonstrado teve resolução suficiente para aparecer em seções sísmica. Os casos destes dois canais do poço 1-AT-1-MA estão em escala subsísmica, suas interpretações foram feitas em função da correlação com os poços vizinhos que mostraram disparidades nas espessuras das seções sedimentares dos segundo e terceiro ciclos transgressivos e regressivos quando comparados com os outros poços. Esta interpretação é melhor visualizada na transect mostrada ao final deste item. Os canais aqui interpretados estão relacionados às segunda e terceira superfícies de regressões máximas, portanto, limites de sequências.

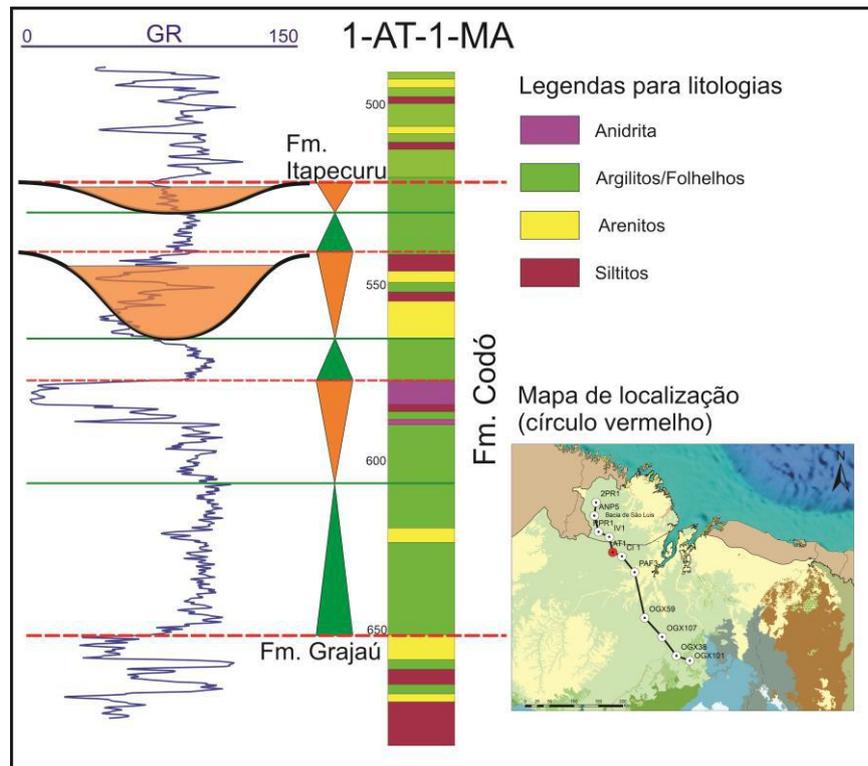


Figura 26 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-AT-1-MA

### 5.3.2.10- POÇO 3-OGX-38-MA

Esse poço também não mostra a sequência completa de ciclos regressivos e transgressivos observados na maioria dos outros poços, porém, diferentemente dos dois poços discutidos anteriormente, isso não se deve a uma modificação do registro deposicional original através de um evento posterior como uma incisão fluvial, mas, tão somente, pela ausência de dados para serem analisados, portanto, não foi possível a identificação no poço 3-OGX-38-MA do último ciclo regressivo da Fm. Codó. Na verdade, o topo do terceiro ciclo transgressivo está marcado em um pico de GR alto, mas, como não há dados além deste, não é possível afirmar, apesar de provável, que o final do terceiro ciclo transgressivo seja onde foi marcado.

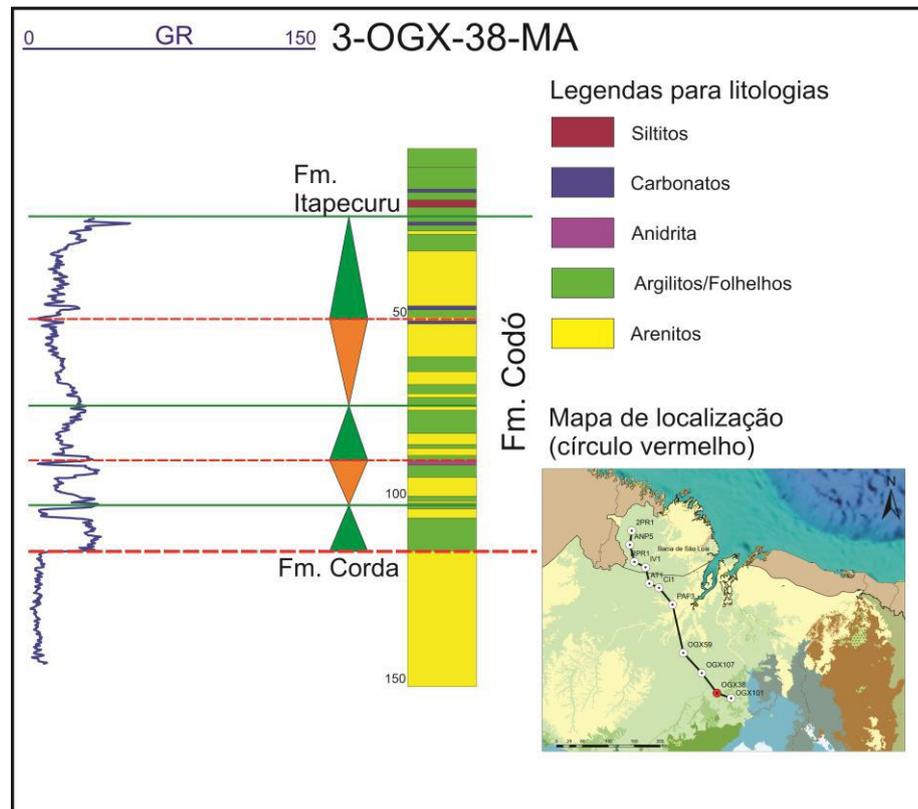


Figura 27 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 3-OGX-38-MA.

#### 5.3.2.11- POÇO 1-OGX-101-MA

Igualmente ao poço anterior, esse poço também apresenta uma ausência de dados, e está impossibilitada a realização de uma análise completa das eletrofácies da formação. Em ambos os poços foram analisados os dados disponíveis até a profundidade onde foram captados, mesmo estando incompleta a informação sobre as eletrofácies da Formação Codó.

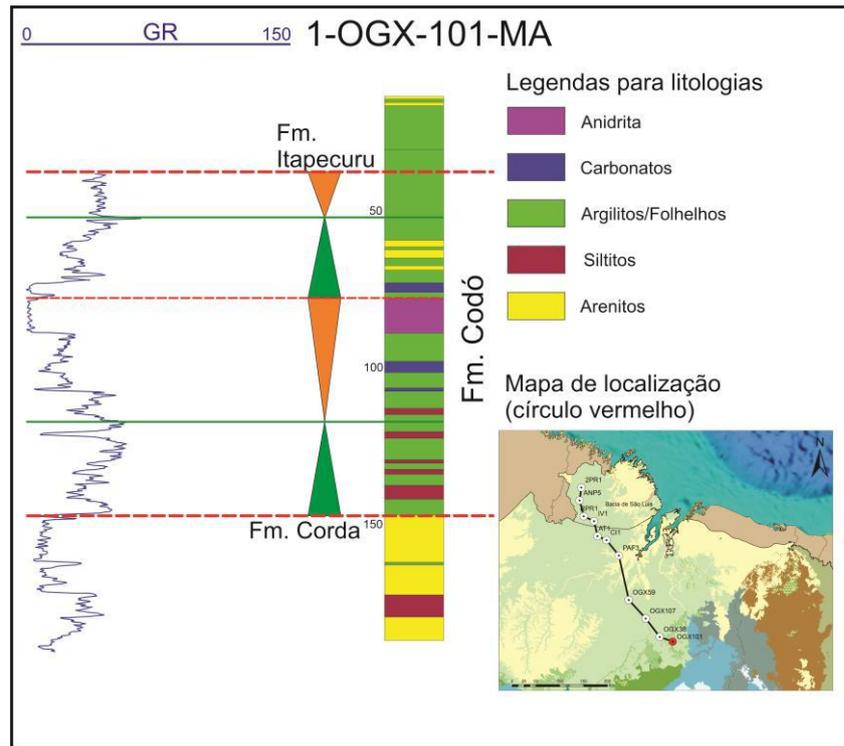
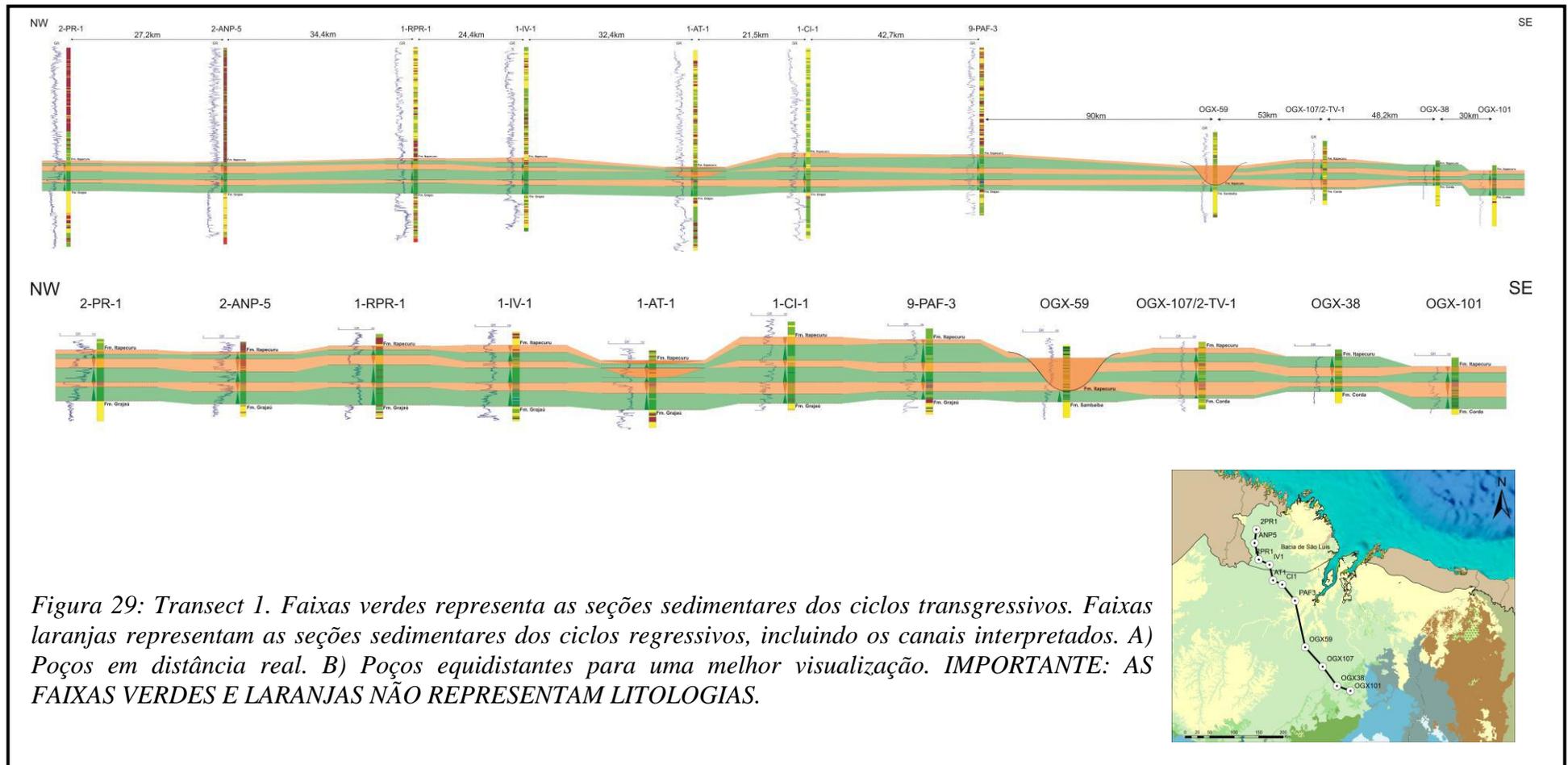


Figura 28 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-101-MA.

### 5.3.2.12- TRANSECT 1 (NW-SE)

Com todos os poços analisados e com as seções sedimentares referentes aos ciclos transgressivos e regressivos interpretadas em cada um deles, foi montada a transect 1, de direção NW-SE com aproximadamente 400 km de extensão em linha reta (figura 29).



### 5.3.3- INTERPRETAÇÃO DOS CICLOS T-R NOS POÇOS DA TRANSSECT 2 (SW-NE)

#### 5.3.3.1- POÇO 2-BAC-1-MA

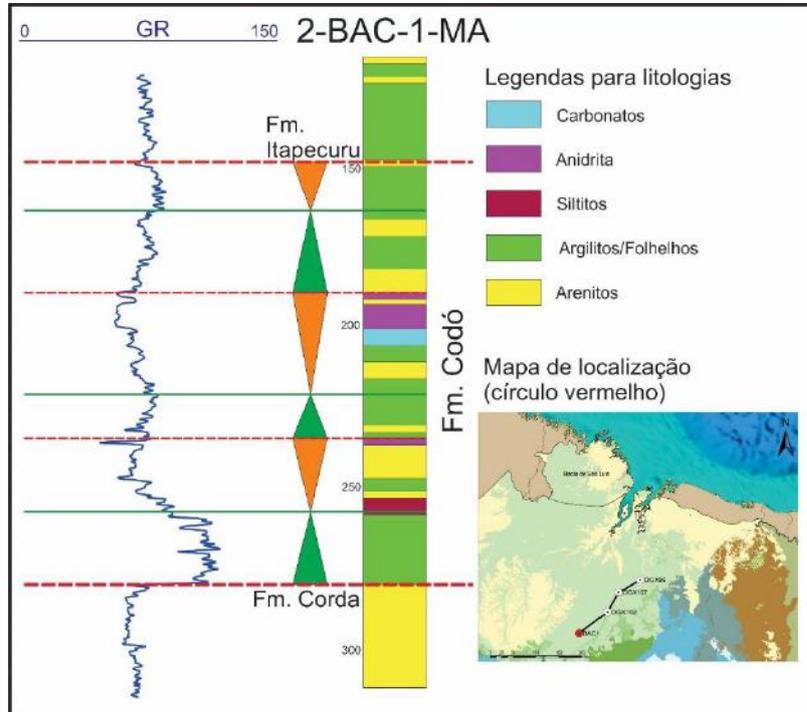


Figura 30 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 2-BAC-1MA

#### 5.3.3.2- POÇO 1-OGX-102-MA

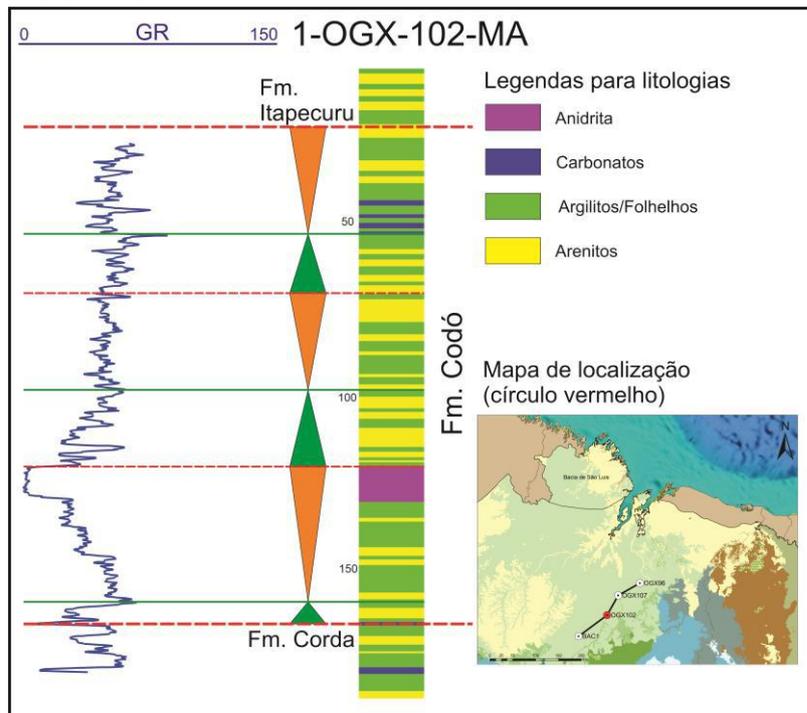
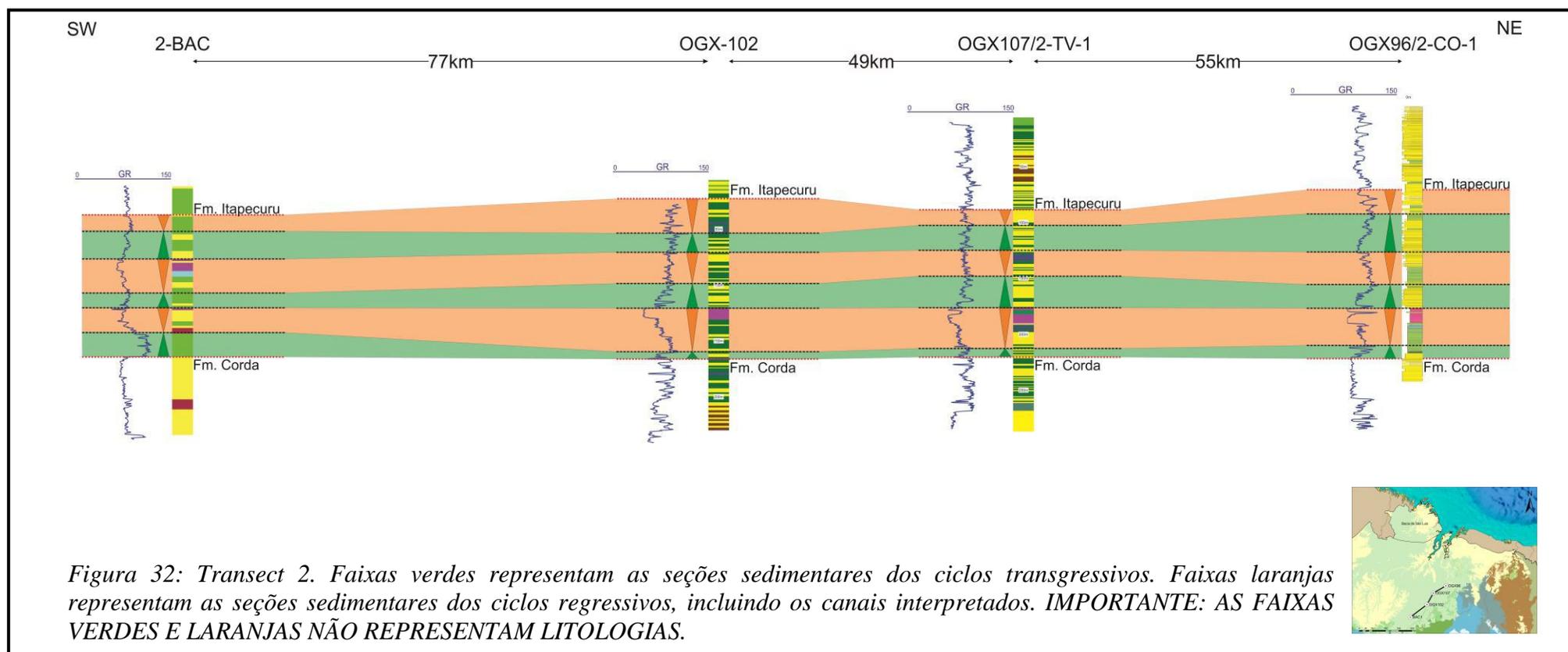


Figura 31 – Análise de eletrofácies e interpretação de ciclos transgressivos e regressivos no poço 1-OGX-102-MA

### 5.3.3.3- TRANSECT 2 (SW-NE)

Com todos os poços analisados e com as seções sedimentares referentes aos ciclos transgressivos e regressivos interpretadas em cada um deles, foi montada a transect 2, de direção SW-NE com aproximadamente 180 km de extensão em linha reta (figura 32).



## **6.0- DISCUSSÕES**

Visando os objetivos desse trabalho de propor um modelo tectono-estratigráfico para a evolução da Formação Codó na porção norte da Bacia do Parnaíba e na bacia de São Luís, os principais pontos a serem discutidos neste item são:

### **6.1 - Ambiente tectônico de deposição da Formação Codó na área de estudo**

Foi observado em todos os poços analisados, os quais estão distribuídos em diagonal em quase toda a área de ocorrência da Fm. Codó na área de estudo perfazendo um total em linha reta (diagonal) de aproximadamente 400 km, que a espessura da desta formação é praticamente constante. Isso favorece a interpretação de que esta formação foi depositada em um ambiente tectônico “calmo” com subsidência de baixa amplitude, mas de alta comprimento de onda. Este tipo de subsidência é compatível com aquelas dirigidas por mecanismos termiais que afetam toda a litosfera fazendo com que esta tenha uma descida suave, mas em grande área.

Esta interpretação não é inédita neste trabalho, posto que vários outros autores já postularam algo semelhante no passado, como por exemplo Rezende e Pamplona (1970) os quais foram os primeiros autores a mencionar que a sequência cretácea da Bacia do Parnaíba tratava-se de uma unidade geotectônica distinta e a nomearam de Bacia Epicontinental do Maranhão.

Posteriormente, Azevedo (1991) definiu a área de ocorrência da Sequência Codó-Grajaú como Bacia do Codó. De acordo com o autor, durante o Aptiano dois processos simultâneos teriam sido responsáveis pela formação da Bacia do Codó. O primeiro processo envolveu uma lenta subsidência regional com aspecto de mecanismo termalmente induzido, sem falhamentos crustais expressivos. O segundo processo foi caracterizado por falhamentos,

subsidiência e estiramento crustal heterogêneo, responsável pela geração do Sistema de Grabéns do Gurupi. Desta forma, este autor propõe um ambiente tectônico de subsidiência termal para o início de deposição da formação Codó, mas que teria evoluído para um ambiente tectônico de rifte mais tarde. Neste trabalho, vê-se, baseado na espessura da Formação Codó, que esta foi toda depositada ainda durante “o primeiro processo” e a Fm. Itapecuru, durante o “segundo processo”.

Góes (1995) definiu a sequência cretácea da Bacia do Parnaíba como uma unidade geotectônica independente, denominada Bacia do Grajaú. Segundo o autor, as incursões marinhas da Formação Codó estariam relacionadas com porções ainda não totalmente soerguidas do Arco Ferrer-Urbano de Santos, somente no Albiano teria ocorrido o ápice do soerguimento do arco. Posteriormente, a norte do arco, foi gerado o sistema de riftes costeiros (Bragança-Viseu, São Luís, Ilha Nova e Barreirinhas) relacionados à ruptura do Gondwana.

D’Souza (2020) propôs que a seção sedimentar aptiana na porção norte da Bacia do Parnaíba e bacia de São Luís foi depositada em uma grande (centenas de milhares de quilômetros quadrados) e rasa (metros a dezenas de metros) bacia do tipo *sag*. Para esta autora a subsidiência responsável por captar esta seção sedimentar da qual a Fm. Codó é o principal representante foi termalmente induzida e estaria relacionada aos efeitos de relaxamento térmico (resfriamento) tardio da superpluma CAMP que soergueu esta mesma área no Neotriássico.

Apesar da interpretação de subsidiência bacinal do tipo *sag* ser considerada hegemônica para o ambiente tectônico da Fm. Codó, há interpretações contra-hegemônicas como aquela oferecida por Rossetti et al. (2001) que propõe que durante a deposição da Fm. Codó já havia rifteamente ativo na área de estudo. Como demonstrado neste trabalho, baseado na espessura da formação Codó, tanto dentro, quanto fora do rifte de São Luís, não é observado nenhum

crescimento de seção sedimentar expressivo que seria típico de um ambiente tectônico de rifte, portanto, este trabalho refuta a proposta contra-hegemônica de Rossetti et al. (2001).

## **6.2 – Desenvolvimento da dinâmica do empilhamento estratigráfico da Formação Codó na porção norte da Bacia do Parnaíba e na Bacia de São Luís.**

Como já exaustivamente explanado nos Referenciais Teóricos deste trabalho (portanto não será repetido em detalhe neste tópico), a análise para a interpretação do desenvolvimento da dinâmica do empilhamento estratigráfico da Fm. Codó foi baseada em duas premissas: análise e interpretação de eletrofácies em perfis de GR e interpretação da Estratigrafia de Sequências baseada em ciclos transgressivos e regressivos como decorrência de um ciclo completo da variação do nível de base da bacia como proposto por Embry & Johannessen (1992) e Embry (2002).

Com base nas premissas reportadas acima foram interpretadas **3 (três) sequências deposicionais** resultantes de **3 (três) ciclos completos de variação do nível de base** na bacia durante o desenvolvimento da Fm. Codó. Tanto a base quanto o topo da Fm. Codó são marcados em uma superfície de regressão máxima, portanto, por princípio da Estratigrafia de Sequências, tanto base, quanto topo da formação Codó representam limites de sequências e, assim sendo, estes limites são superfícies passíveis de sofrerem erosão o que denotaria passagem não transicional entre a formação Codó e as formações soto e sobrepostas a ela. Porém, isso não é uma regra, pois, imediatamente após um ciclo de ressecamento da bacia pode começar um ciclo de afogamento não sendo claro o caráter erosivo. Esta observação da mesma forma que vale para base e topo da Fm. Codó, também vale para os limites das sequências deposicionais internas a ela.

Em algumas situações, como demonstrados por alguns poços mostrados no item Resultados, os ciclos transgressivos-regressivos que definem a sequência deposicional não são

claramente definidas. Nestes casos a interpretação dada é que o registro sedimentar foi alterado por eventos pós-deposicionais, no caso, incisões de canais relacionados aos momentos de assoreamento da bacia. Ou, em outros casos, simplesmente ausência de dados nos perfis analisados.

Da mesma forma que a Fm. Codó como um todo apresenta pouca variação de espessura em uma distância NW-SE de cerca de 400 km de extensão em linha reta, as suas sequencias deposicionais internas também obedecem ao mesmo padrão. Isso reforça a interpretação de um ambiente tectônico extenso, mas, raso, no qual pequena variação, para cima ou para baixo, no nível de base da bacia inundaria ou ressecaria uma grande área da bacia rapidamente.

Outra conspícua constatação deste trabalho que também foi observada pela interpretação sísmica no âmbito do Projeto Alagoas, como demonstrado por D'Souza (2020) é a presença ubíqua de anidrita na área de estudo. Esta interpretação contrasta com grande parte dos trabalhos sobre os evaporitos da Fm. Codó feitos com base em afloramentos.

Em relação especificamente à evolução estratigráfica da Fm. Codó, até o presente não houve um trabalho com dados que permitisse a interpretação para toda a bacia. Todos os trabalhos feitos sobre este assunto referem-se a análises pontuais, muito detalhadas em nível faciológico, mas que são extrapoladas para o contexto bacinal. Porém, como demonstramos, a área da bacia que captou a Fm. Codó foi muito vasta e a extrapolação, ainda que de uma análise detalhada, de um ponto da bacia pode não ser representativa para a bacia como um todo.

Pedrao (1995), por exemplo, analisou amostras de calha, amostras laterais e testemunhos de 20 poços perfurados pela Petrobras nas bacias riftes de São Luís e Bragança-Vizeu com foco na montagem em um arcabouço palinoestratigráfico e na proposição de modelos paleoambientais para a seção sedimentar Aptiana-Cenomaniana. Apesar de ser sido um trabalho de muito detalhe não houve análise de poços na porção Aptiana da Bacia do

Parnaíba, a qual em área é muito mais extensa que as bacias de São Luís e Bragança-Viseu juntas.

Antonioli (2001), também procedeu análise uma análise estratigráfica, na verdade, quimioestratigráfica, mas isso foi em apenas 3 poços localizados na porção NE da área de ocorrência dos depósitos cretáceos na Bacia do Parnaíba. Esta autora identificou 4 (quatro) intervalos com características químicas diferentes denominando-os de intervalos A, B, C e D. Outro trabalho de detalhe, mas, também, local.

Mendes (2007), em um detalhado trabalho de análise faciológica das formações Grajaú e Codó em testemunhos de sondagens de 4 (poços) localizados na porção leste da área de ocorrências dos depósitos cretáceos na Bacia do Parnaíba “com os objetivos de interpretar sistemas deposicionais e identificar superfícies estratigráficas para correlação e caracterização de seqüências deposicionais”. Este autor identificou 4 (quatro) seqüências deposicionais designando-as Sequência Redutora, Sequência Oxidante, Sequência 1 e Sequência 2. Também esse um trabalho detalhado, mas, em uma porção muito localizada da bacia

Bastos et al. (2014), da mesma forma que Antonioli (2001,) procedeu análises quimioestratigráficas em amostras de testemunhos de furos de sondagens na mesma área dos poços analisados por Mendes (2007). Um dos poços analisado por Bastos et al. (op. cit.) (1-UN-24-PI) foi, também, um dos poços que fez parte do estudo de Mendes (2007). Bastos et al. (2014) identificou 5 intervalos quimioestratigráficos diferentes, nominados pelas letras de A a E. Novamente outro trabalho de detalhe, mas, muito localizado.

Como visto, diferentes técnicas de análises já foram aplicadas à Fm. Codó para entendimento de sua evolução estratigráfica, porém, todas, como já mencionado anteriormente, feitas em localizações pontuais da bacia, diferentemente deste trabalho que analisou uma base de dados distribuída regionalmente na bacia. Outra característica do estudo da evolução estratigráfica da FM. Codó é que ainda não foi feita uma análise aplicando-se a

técnica de interpretação da Estratigrafia de Sequências baseada em ciclos Transgressivos-Regressivos como consequência da variação do nível de base da bacia. Desta forma, a contribuição inovativa deste trabalho está tanto no caráter regional dos dados analisados como na técnica de análise.

### **6.3 – Sistemas deposicionais relacionados aos ciclos transgressivos e regressivos das 3 (três) sequências deposicionais interpretadas.**

Como discutido anteriormente, em todos os poços analisados foi observado que a base da Fm Codó é discordante posto que localizada em uma superfície de regressão máxima. Desta forma, o primeiro ciclo deposicional da Fm. Codó é transgressivo. Como também já discutido anteriormente, o método de análise da evolução estratigráfica de uma seção sedimentar baseado na interpretação de eletrofácies não permite detalhes ao nível da interpretação litofaciológica, portanto o que se pode dizer de um ciclo transgressivo em uma bacia do tipo *sag* relativamente rasa é que o afogamento da bacia se dá rapidamente com isso a variação de sistemas deposicionais que podem ocorrer neste ciclos estará sempre restrita à borda da bacia, a qual não existe consenso se no tempo presente esta borda é a mesma da época da deposição. Como já reportado, a interpretação sísmica sugere que pelo menos as bordas leste e sudeste foram soerguidas após a deposição da formação Codó. A presença de depósitos de anidritas (no tempo presente, de fato, gipsita, uma vez que houve a hidratação dos depósitos originais em função da tardia exumação dos mesmos à superfície) na superfície nas atuais bordas da área de ocorrência da Fm. Codó na Bacia do Parnaíba também reforça a interpretação de soerguimento pós-deposicional.

Desta forma, o ciclo transgressivo será melhor representado em escala regional como um contínuo espessamento de seção sedimentar de depósitos argilosos que culminam na

superfície de inundação máxima a qual pode ser correlacionada regionalmente na bacia sem maiores problemas.

Para a análise proposta neste trabalho uma pergunta que necessita ser respondida é que tipo de depósito ou depósitos se desenvolveriam na bacia durante seu processo de assoreamento condicionado pela regressão a qual é condicionada pela queda do nível de base? Neste caso, a resposta apresentada é a mesma já postulada por Mendes (2007) que sugeriu a instalação sistemas fluviais entrelaçados (*braided*) com pequenos deltas associados nas situações de canais fluviais maiores e mais incisivos os quais, de fato, são interpretados neste trabalho (figura 33). As junções de vários sistemas fluviais entrelaçados permitem a formação de extensos lençóis de areias em escala de bacia visto o sistema deposicional como um todo passa a ter um caráter híbrido entre sistemas fluviais e eólicos permitindo que o retrabalhamento eólico dos sistemas fluviais transporte as areias para fora do contexto puramente fluvial (Scherer, 2008; Giannini et al., 2008). Esta dinâmica deposicional favorece o desenvolvimento de lençóis de areia que podem ser rastreados por toda a bacia. Daí porque os ciclos regressivos foram sempre marcados nos topos dos intervalos interpretados como depósitos arenosos tanto no perfil de GR, quanto nas descrições litológicas das amostras de calhas.

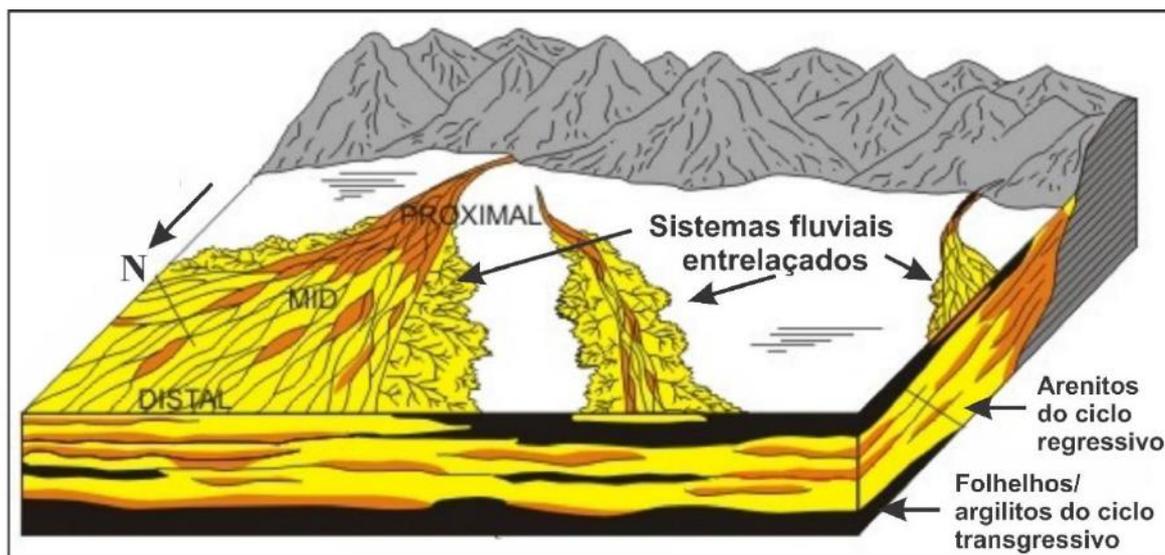


Figura 33 – Bloco diagrama esquemático usado neste trabalho como análogo para representar sistemas deposicionais fluviais que podem ter evoluído para sistema fluvio-eólico conectando os sistemas fluviais individuais e formando lençóis de areia durante os ciclos regressivos (regressões forçadas) da Fm. Codó em uma bacia do tipo sag, vasta, mas, rasa. Todas as informações relevantes no corpo da figura.

Do ponto de vista da Estratigrafia de Sequências o modelo proposto por Coe et al. (2003) mostrado na figura 34 representa bem a situação interpretada para os 3 (três) ciclos regressivos da Fm. Codó. Este bloco diagrama esquemático foi usado neste trabalho como análogo para representar o trato regressivo em uma bacia do tipo *sag* cuja geometria de seu assoalho é do tipo “rampa”. Notar que a figura mostra uma regressão forçada pontuada, daí os vários degraus mostrados entre as posições alta e baixa do NÍVEL DE BASE. Mesmo assim, a figura mostra uma conexão entre os depósitos arenosos de cada estágio individual, os quais no conjunto formam um lençol de areia, mesmo havendo um diacronismo entre os depósitos mais próximos da área fonte de sedimentos (mais velhos) e aqueles mais distais (mais novos).

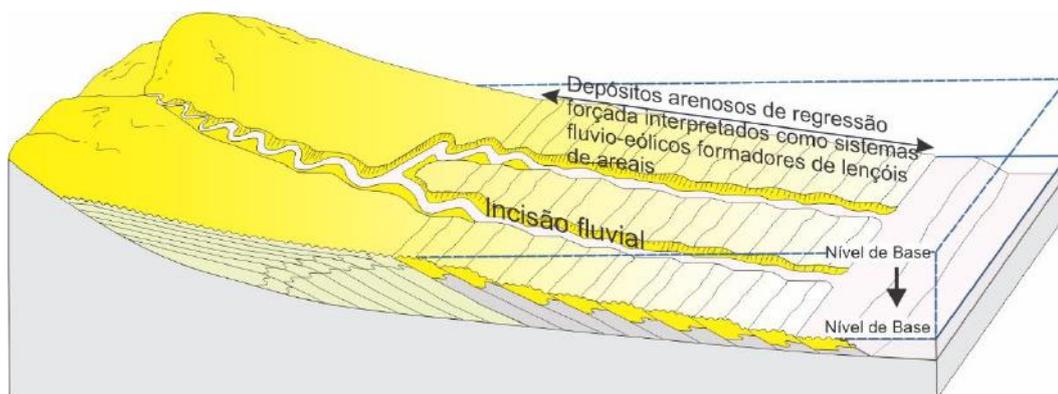


Figura 34 – Bloco diagrama modificado de Coe et al. (2003). Informações relevantes no corpo da figura.

A condição climática joga um papel preponderante sobre os tipos de depósitos que ocorrem durante o ciclo regressivo. Sob uma situação de aridez depósitos evaporíticos podem tanto acontecer localizadamente sob a forma de depósitos de *playa lake*, ou generalizadamente na bacia na situação de uma vasta área rasa sob severa condição de aridez. Esta é a explicação fornecida para a ocorrência ubíqua de anidrita na Fm. Codó no final da primeira sequência deposicional. Este tipo de situação deposicional tem sido relativamente comum na Bacia do Parnaíba desde o Permiano. Vastas camadas de anidritas, muito maiores do que aquela que ocorre na Fm. Codó, são documentadas nos depósitos do Permiano e do Triássico na bacia do Parnaíba (Góes & Feijó, 1994; Vaz et al., 2007). Pelo menos em um poço foi documentada a presença de evaporitos (anidrita) fechando o segundo ciclo regressivo da Fm. Codó. Este seria um exemplo de depósito localizado de *Playa Lake*.

De uma maneira geral os dados analisados permitem ainda uma inferência relacionada à condição climática da bacia durante a deposição da Fm. Codó baseada nas seguintes premissas: (1) o primeiro ciclo regressivo termina com deposição generalizada de evaporitos; (2) o segundo ciclo transgressivo termina com espessos corpos de arenitos com depósito de *playa lake* localizado; o terceiro ciclo regressivo termina com delgados depósitos de arenitos. Está sequência mostra uma clara tendência de umidificação das condições climáticas na bacia da base para o topo da Fm. Codó.

## 7- CONCLUSÕES

O conjunto de dados analisados neste trabalho e as técnicas de análises empregadas permitiram as seguintes conclusões:

- A bacia sedimentar que recebeu a Fm. Codó na porção centro-norte da Bacia do Parnaíba e na Bacia de São Luís era do tipo *sag* com subsidência de baixa amplitude, mas grande comprimento de onda, ou seja, a subsidência afetou uma vasta área geográfica, porém, com baixa taxa;

- O tipo de subsidência (extensa, mas, rasa), deduzido, pelo padrão da distribuição dos estratos da Fm. Codó é compatível com subsidência termal a qual afeta a Litosfera em grande área decorrente de reajustes térmicos na interface Litosfera-Astenosfera.

- Quando da deposição da Fm. Codó os ambientes tectônicos do hoje rifte de São Luís (Bacia de São Luís) e da porção centro-norte da Bacia do Parnaíba eram semelhantes, fato demonstrado pela total inexistência de crescimento de seção sedimentar da Fm. Codó na área do atual rifte de São Luís.

- O desenvolvimento estratigráfico da Fm. Codó deu-se através de 3 (três) Sequências Depositionais resultantes de 3 (três) variações completas do nível de base na bacia.

- As 3 (três) Sequências Depositionais foram definidas através da interpretação de ciclos transgressivos e regressivos que por sua vez foram deduzidos a partir das análises dos padrões de eletrofácies em perfis de GR - usados como *proxies* para interpretação da variação vertical de litofácies em um ponto- de poços perfurados pela indústria do petróleo e pelo Projeto Alagoas.

- Os depósitos que marcam o final de cada um dos ciclos regressivos (1- evaporitos contínuos em quase toda área da bacia; 2- arenitos com pequenos depósitos de evaporitos

localizados; 3- somente arenitos) sugerem uma tendência geral de humidificação da bacia com o tempo.

- Os depósitos dos ciclos transgressivos são dominados por rochas argilosas culminando, nos dois primeiros ciclos em rochas argilosas ricas em matéria orgânica como sugerido pelos altos valores de GR mostrados nos perfis analisados.

- Os depósitos do primeiro ciclo regressivo são dominados por intercalações entre arenitos, carbonatos, culminando com evaporitos.

- Os depósitos dos segundo e terceiro ciclos transgressivos são dominados por lençóis de areia como consequência de sistemas deposicionais flúvio-eólicos desenvolvidos em uma vasta planície que era rapidamente exposta durante as regressões forçadas em decorrência da geometria do assoalho da bacia ser uma rampa muito suave.

Estas conclusões respondem as questões formuladas na introdução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. de. (1967). *Origem e evolução da plataforma brasileira. Divisão de Geologia e Mineralogia*. Rio de Janeiro, DNPM/DGM. Boletim 241, 36 p.
- Antonioli, L. (2001). *Estudo Palino-Cronoestratigráfico da Formação Codó-Cretáceo Inferior do Nordeste Brasileiro*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 265p.
- Azevedo, R. P. (1991). *Tectonic Evolution of Brazilian Equatorial Continental Margin Basins*. University of London, Tese de Doutorado, 445p.
- Bianchinni, A. R. Análise e Interpretação Estratigráfica Baseada na Integração de Dados de Poços do Intervalo Eossiluriano ao Eocarbonífero da Bacia do Parnaíba. 2018. Dissertação (Mestrado em Análise de Bacias) – Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Blakey, R. C. (2008). Gondwana paleogeography from assembly to breakup - A 500 m.y. odyssey. *Special Paper of the Geological Society of America*, 441(01), 1–28. 123
- Caputo, M. V. (1984). *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*. University of California, Tese de Doutorado, 586p.
- Catuneanu, O. (2017). *Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology. Stratigraphy & Timescales*, p.1–57.
- CATUNEANU, O., ABREU, V., BHATTACHARYA, J.P., BLUM, M. D., DALRYMPLE, R.W., ERIKSSON, P. G., FIELDING, C. R., FISHER, W. L., GALLOWAY, W. E., GIBLING, M. R., GILES, K. A., HOLBROOK, J. M., JORDAN, R., KENDALL, C. G. St. C., MACURDA, B., MARTINSEN, O. J., MIAL, A. D., NEAL, J. E., NUMMENDAL, D., POMAR, L., POSAMENTIER, H.W., PRATT, B. R., SARG, J.F., SHANLEY, K.W., STEEL, R. J., STRASSER, A., TUCKER, M. E., WINKER, C., 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, vol. 92, 1–33.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of sequence stratigraphy*. Edmond, Elsevier, 375p.
- Cordani, U. G., Brito-Neves, B. B., & D'Agrella-Filho, M. S. (2003). From Rodinia to Gondwana: A review of the available evidence from South America. *Gondwana Research*, 6(2), 275–283.
- COE, A.L. & CHURCH, K.D. 2003. Part 2 Sequence Stratigraphy and Sea-Level Change. In: The Sedimentary record of sea-level change. Editors: Coe, A. L.; Bosence, D. W.J.; Church, K. D.; Flint, S. S.; Howell, J. A. and Wilson, R. C. L. Cambridge, UK: Cambridge University Press and the Open University. 57-98pp. 288p.
- DOTT JR., R. H. Laurence L. Sloss and the Sequence Stratigraphy Revolution. *GSA Today*, p 24-26, Março, 2014.

D'Souza, L. S. Evolução Tectônica e Estratigráfica Pós Paleozóica da Porção Noroeste da Bacia do Parnaíba e da Bacia de São Luís, Brasil. (2020). Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

EMBRY, A.F. 2002. Transgressive-Regressive (T-R) Sequence Stratigraphy. *In*: Armentrout, J. and Rosen, N. (eds.). Sequence stratigraphic models for exploration and production. Society for Sedimentary Geology (SEPM), 22nd Annual Gulf Coast Section SEPM Conference Proceedings, Houston, p. 151-172.

EMBRY, A. F., JOHANNESSEN, E. P., 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. *In*: Vorren, T. O., Berg - sager, E., Dahl-Stammes, O. A., Holter, E., Johansen, B., Lie, E., Lund, T. B. (Eds.), Arctic Geology and Petroleum Potential, vol. 2 (Special Publication). Norwegian Petroleum Society (NPF), pp. 121–146.

Ernst, R. E. (2014). LIPs and links with contractional structures. *In*: Large Igneous Provinces (pp. 399–417). Cambridge: Cambridge University Press.

Ernst, R. E. (Ed.). (2014b). LIPs and topographic changes. *In*: *Large Igneous Provinces* (pp. 370–398). Cambridge: Cambridge University Press.

Frazier, D. E. (1974). Depositional-episodes: their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin. *Virtual Landscapes of Texas*.

Góes, Á., & Feijó, F. (1994). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências Da Petrobras*, 8(1), 57–67.

Góes, A. M. (1995). *Formação Poti (Carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 171p.

Griffiths, R. W., & Campbell, I. H. (1991). Interaction of mantle plume heads with the Earth's surface and onset of small-scale convection. *Journal of Geophysical Research*, 96(B11).

HOLZ, M. 2012. Estratigrafia de sequências: histórico, princípios e aplicações. Rio de Janeiro: Interciência. 2012. p.272

KARAGODIN, Y. N. Relações mútuas entre os complexos cíclicos sedimentares em seções de bacias contendo petróleo e gás. Dohl. Akad. Nauk. SSSR, n.220, p.1414-1416, 1975. (traduzido do russo por FUCS, A.).

Lima, H. P.; Aranha, I. G. F.; Feijó, f. J. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Gráben de Ilha Nova. (1994) *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 8(1), 111-116.

Marzoli, A., Renne, P. R., Piccirillo, E. M., Ernesto, M., Bellieni, G., & De Min, A. (1999). Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, 284(5414), 616–618.

Mendes, M. da S. (2007). Análise estratigráfica do intervalo formacional Grajaú-Codó (Aptiano) da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 113p.

Mitchum Jr, R. M. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 11. *Glossary of terms used in seismic stratigraphy: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation*. AAPG.

Mitchum Jr, R. M., Vail, P. R., & Sangree, J. B. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. *Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation*. AAPG

Mitchum Jr, R. M., Vail, P. R., & Thompson III, S. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 2. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis: Section 2. *Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation*. AAPG

Mizusaki, A. M. P., Thomaz-Filho, A., Milani, E. J., & De Césero, P. (2002). Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 183-198.

NERY, G.G. 1990. Perfilagem Geofísica em Poço Aberto. Salvador, BA, p.231.

OLIVEIRA, D. C.; MOHRIAK, W. U. 2003. Jaibaras Trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag Basin, Northeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, Guildford, v. 20, p. 351-383. 2003

Pedraõ, E. (1995). *Palinoestratigrafia e evolução paleoambiental de sedimentos aptianos-cenomanianos das bacias Bragança – Viseu e São Luís (Margem Equatorial Brasileira)*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 215p.

Rezende, W. M., & Pamplona, H. R. P. (1970). Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbanos Santos. *Boletim de Técnico Da Petrobras*, 13(1/2), 5–14.

RIDER, M. 2004. *The Geological interpretation of well logs*. Second Edition. Scotland. Sutherland, Whittles Publishing. 280p.

Rossetti, D. de F., Góes, A. M., & Truckenbrodt, W. (2001). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), 264.

Rossetti, D. F., Góes, A. M., & Souza, L. S. B. (2001). Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(2), 113–130.

SCHLAGER, W. Fractal nature of stratigraphic sequences. *Geology*; v. 32; no. 3; p. 185–188; Março 2004; doi: 10.1130/G20253.1.

Scotese, C. R. (2014). Atlas of Late Cretaceous Maps, Paleomap Atlas for ArcGIS, Vol. 2, The Cretaceous. *Mollweide Projection*. Evanston, IL: *Paleomap Project*, 16-22.

Sloss, L. (1963). Sequences in the Cratonic Interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 74(2), 93–114.

Sloss, L. L. (1949). Integrated facies analysis. In CHESTER R LONGWELL, R. C. MOORE, E. D. MCKEE, S. W. MÜLLER, E. M. SPIEKER, H. E. WOOD, 2ND, L. L.

SLOSS, W. C. KRUMBEIN, E. C. DAPPLES (eds.). *Sedimentary facies in geologic history: Conference at meeting of the Geological Society of America held in New York, New York, November 11, 1948*. Geological Society of America.

Vail, P. R. (1987). Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure, p.1-10.

Vail, P.R., and 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. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 51-52. (AAPG Memoir, 26).

Vail, P.R., Mitchum Jr, R.M., and Thompson III, S. (1977a). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea-level from coastal onlap, in Payton, C.E. (ed) Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 63-81. (AAPG Memoir, 26).

Vail, P.R., Mitchum Jr, R.M., and Thompson III, S. (1977b). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: Global cycles of Relative Changes of Sea Level, in Payton, C.E. (ed) Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 83-97. (AAPG Memoir, 26).

Vail, P.R., Todd, R.G., and Sangree, J.B. (1977c). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 5: Chronostratigraphic significance of seismic reflexions, in Payton, C.E. (ed) Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 99-116. (AAPG Memoir, 26).

Vaz, P. T., Rezende, N. G. A. M., Wanderley Filho, J. R., & Silva Travassos, W. A. (2007). Bacia do parnaíba. *Boletim de Geociencias Da Petrobras*, 15(2), p.253–263.

Wheeler, H. E. (1964). Baselevel, lithosphere surface, and time-stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 75(7), 599-610.

Wheeler, H. E., & Murray, H. H. (1957). Base-level control patterns in cyclothemic sedimentation. *AAPG Bulletin*, 41(9), 1985-2011.

Zalán, P. V. (2007). Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *Boletim de Geociencias Da Petrobras*, 15(2), 341–345.