

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

MURILO BARROS SAIBRO

**INTERPRETAÇÃO PALEODEPOSICIONAL E PALEOAMBIENTAL DA
FORMAÇÃO CODÓ COM BASE EM QUIMIOESTRATIGRAFIA, NA
ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES – BACIA DO PARNAÍBA.**

Niterói

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BIF
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S132i Saibro, Murilo Barros
INTERPRETAÇÃO PALEODEPOSICIONAL E PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO
CODÓ COM BASE EM QUIMIOESTRATIGRAFIA, NA ÁREA DO PARQUE DOS
GAVIÕES ? BACIA DO PARNAÍBA. / Murilo Barros Saibro ; Antonio
Fernando Menezes Freire, orientador ; Cleverson Guizan Silva,
coorientador. Niterói, 2021.
94 f. : il.

Niterói, 2021.

1. Quimioestratigrafia. 2. Formação Codó. 3. Bacia do
Parnaíba. 4. Cretáceo. 5. Produção intelectual. I. Freire,
Antonio Fernando Menezes, orientador. II. Silva, Cleverson
Guizan, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense.
Instituto de Física. IV. Título.

CDD -

Para aqueles que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Queria de agradecer todos do Projeto Parnaíba por essa jornada de crescimento incrível que tive nos últimos anos de faculdade, em especial ao meu Orientador Professor Fernando Freire e ao meu Coorientador Professor Cleverson Guizan por me permitirem entrar de cabeça nesse grupo maravilhoso; à Petrobras pelo apoio financeiro e à K2 pela disponibilização do *software* Trace. Agradeço também à Lídia Calonio pela criteriosa revisão.

Agradeço aos pesquisadores que me cederam os dados como Deise, Luiza, Lídia, Jeniffer, Carlos, Taisa, e das pessoas que descreveram e analisaram as amostras, Guilherme, Bruna, Luanne e Barbara.

Também agradeço à ANP/BDEP pela liberação dos dados, à UFF e ao GGO pela minha formação universitária e à PGN pela cessão das amostras de calha.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial Juliana, Ana Carla, Lívia e João Victor, que dividiram comigo o drama de ser universitário em uma das melhores faculdades do país.

E, por fim, um agradecimento especial ao Alexandre, meu namorado que sempre esteve comigo em todos os momentos, me apoiando, dando bronca e me incentivando. Acredito que, sem a presença dele, seria muito mais difícil terminar a faculdade.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar a passagem Aptiano-Albiano na Formação Codó, cujos os depósitos sedimentares lagunares-transicionais são principalmente relacionados à fase inicial de separação dos continentes Africano e Sul-americano. A Formação Codó faz parte da Supersequência Cretácea, marcada por uma importante transgressão marinha associada à abertura do Atlântico Sul. Através da descrição detalhada de amostras de calha, perfis de poços e integração com dados geoquímicos, obtidos com o uso de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF). Foi feita uma correlação entre seis poços, todos eles perfurados na região do Parque dos Gaviões, principal área produtora de gás natural da Bacia do Parnaíba. As amostras de calha desses poços foram redescritas em detalhe no intervalo de interesse, tendo sido gerado um perfil litológico reinterpretado para cada poço, com o auxílio do perfil de Raios Gama (GR) corrido a poço aberto e comum à maioria dos poços. Para os estudos quimioestratigráficos foram analisadas 77 amostras, tendo sido geradas curvas dos elementos químicos Ti, Ca, Mg, Sr, Rb, Al, Mn e Fe, além das razões Mg/Ca, Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Sr/Rb, Mn/Al, Ni/Co, V/Al, V/Cr, Th/U e U/K, para a compreensão da origem sedimentar (aporte terrígeno ou sedimentação marinha autóctone). Além disso, foi realizada uma análise de agrupamento a fim de ter um melhor controle de qualidade das amostras. A correlação dos dados dos poços permitiu a observação de tendências nas curvas geoquímicas e litológicas que sugerem uma alternância entre inundações marinhas em direção ao continente (retrogradação) e aumento da taxa de sedimentação continental continentais (progradação), sugerindo que a passagem Aptiano-Albiano, nesta porção da Bacia do Parnaíba, foi marcada por alternância transgressivas-regressivas da linha de costa.

PALAVRAS-CHAVE: QUIMIOESTRATIGRAFIA; FORMAÇÃO CODÓ; BACIA DO PARNAÍBA.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to study the transition of Aptian-Albian, in Codó Formation, where the sedimentary deposits are essentially related to the separation between the African and South American continents. The Codó Formation is part of the Cretaceous Supersequence and marks an important marine transgression related to the South Atlantic opening. Through a detailed description of cuttings, well logs and the integration with geochemical data, obtained with the use of Energy Dispersion X-Ray Fluorescence Spectrometry (EDXRF) in the same samples, a correlation was made between six wells, all they drilled in the region of Parque dos Gaviões, the main natural gas producing area in the Parnaíba Basin. Cuttings from these wells were redescribed in detail in the interval of interest, having generated a reinterpreted lithological log for each well, with the aid of the Gamma Ray (GR), open role log common to most wells. EDXRF analysis on cuttings provided the generation of elemental graphics like Ti, Ca, Mg, Sr, Rb, Al, Mn and Fe. Element rations commonly reported in the literature were used in this work: Mg/Ca, Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Sr/Rb e Mn/Al, Ni/Co, V/Al, V/Cr, Th/U and U/K, to comprehend the sedimentary origin. In addition, a cluster analysis was carried out in order to have a better quality control of the samples. The correlation among the logs contributes to the recognition of lithologies and geochemical tendencies, suggest alternation between continental input (progradation) and flooding (retrogradation), suggesting the Aptian-Albian transition, in this area of the Parnaíba Basin, occurred in pulses.

KEYWORDS: CHEMOSTRATIGRAPHY; CODÓ FORMATION; PARNAÍBA BASIN

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo	8
1.2	Histórico Exploratório	9
2	ÁREA DE ESTUDO.....	10
2.1	Embasamento.....	12
2.2	Evolução Tectonoestratigráfica	13
2.3	Geologia Local – Formação Codó.....	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1	Amostras de Calha.....	23
3.2	Perfil Geofísico de Raios Gama (GR).....	23
3.4	Gamaespectrometria	25
3.5	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF)	26
3.6	Intemperismo, Erosão, Deposição e Sedimentação.....	29
3.6.1	Intemperismo.....	29
3.6.2	Erosão	32
3.6.3	Deposição.....	32
3.6.4	Soterramento.....	34
3.6.5	Diagênese.....	34
3.7	<i>Proxies</i> Geoquímicos e Estudos Paleoambientais.....	35
3.7.1	Elementos Paleoredox	36
3.7.2	<i>Proxies</i> de Variação de Umidade	37
3.7.3	<i>Proxies</i> de Produtividade Marinha	38
3.7.4	<i>Proxies</i> de Salinidade	39
3.7.5	<i>Proxies</i> Gamaespectrais	39
4	METODOLOGIA.....	41
4.1	Preparo das Amostras de Calha	41
4.2	Descrições.....	44
4.3	Armazenamento e Seleção	46
4.4	Gamaespectrometria	47
4.5	Análises de Fluorescência de Raios-X (EDXRF).....	48
4.6	Análises Estatísticas dos Dados	49
4.6.1	Análises de Agrupamentos – AA.....	50
5.	RESULTADOS.....	51

5.1 Análise Qualitativa dos Dados Gerados pelo EDXRF.....	51
5.2 Análise Estatística (Dendograma).....	58
5.3 Razões Geoquímicas Utilizadas e Litologias Interpretadas	60
6 DISCUSSÕES.....	61
6.1 Interpretação Litológica	61
6.2 Interpretações da Análise de Agrupamento (AA)	63
6.3 Interpretações dos <i>Proxies</i> Geoquímicos	64
6.4 Correlações dos Dados	81
7 CONCLUSÕES	84
8 REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

A Bacia do Parnaíba, localizada no Nordeste brasileiro, englobando seis estados (Piauí, Maranhão, Pará, Tocantins, Bahia e Ceará), é objeto de muitas discussões, principalmente quando se refere à Formação Codó, a qual se estima ter sido depositada no Neoptiano/Eoalbio (Vaz *et al.*, 2007), período de incursões marinhas na região. Esta unidade está inserida na Supersequência Cretácea, abrangendo cerca de 170.000 Km² e com espessura máxima de 180 m (Lima e Leite, 1978).

Em diversas bacias brasileiras o registro sedimentar do período Cretáceo está intimamente relacionado a origem e a evolução do Oceano Atlântico. Na Bacia do Parnaíba, em particular, não há um consenso no meio científico relacionado à sua interpretação paleoambiental, porém há discussões sobre como se deu a influência marinha sobre o registro sedimentar. Alguns autores acreditam que seja o resultado da formação de lagoas hipersalinas, enquanto outros atribuem a incursões marinhas (*seaways*) ou até mesmo a golfos (Paz e Rossetti 2001; Arai 2014; Rodrigues, 1995).

Este estudo foi realizado na região denominada de Parque dos Gaviões (Figura 1), uma importante área produtora de gás natural no estado do Maranhão, e foi patrocinado pelo projeto de PD&I denominado “Identificação de superfícies estratigráficas através das razões de C e N e dos isótopos de C e N”.

1.1 Objetivo

O estudo propõe uma reavaliação de seis poços da área do Parque dos Gaviões integrando dados geofísicos, geológicos e geoquímicos com a finalidade de realizar uma reconstituição paleoambiental local da Formação Codó. Esse trabalho é baseado na interpretação de análises de Fluorescência de Raios-X por dispersão de energia (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence - EDXRF) realizadas em amostras de calha dos poços selecionados.

A contribuição do EDXRF para esse trabalho foi a identificação de concentrações de elementos químicos nas amostras de calha e gerar razões. A partir delas, realizamos a interpretação das mesmas para análise geoquímica em amostra de calha para ajustar quimiofacies e a partir disso criar uma correlação entre os poços.

Alguns desses *proxies* são notoriamente especificados na literatura como um indicador para certo tipo de ambiente/origem sedimentar podendo-se, a partir desses dados, inferir o paleoambiente.

A grande importância desse estudo é contribuir com as pesquisas na Bacia do Parnaíba que, apesar do seu grande potencial produtor, é muito pouco estudada em comparação às outras bacias brasileiras. Além disso, como a pesquisa se propõe a estudar especificamente a deposição durante o Cretáceo, um momento considerado decisivo da história geológica da América do Sul e da África.

1.2 Histórico Exploratório

A exploração de Hidrocarbonetos na Bacia do Parnaíba pode ser dividida em quatro fases:

- 1) Teve início na década de 1950, com trabalhos da CNP (Conselho Nacional de Petróleo), que resultaram em levantamentos geológicos de superfície e na perfuração de dois poços no estado do Maranhão (Araujo, ANP, 2017);
- 2) Iniciada a partir da criação da Petrobras, em 1953. Foram realizados diversos levantamentos geológicos e geofísicos na bacia e a perfuração de 25 poços exploratórios. Durante esse processo, foram identificados indícios de óleo e gás (Araujo, 2017);
- 3) A partir de 1975, onde foram retomados os trabalhos com novas campanhas sísmicas e aeromagnetométricas. No início da década de 80, empresas como ESSO e Anschutz iniciaram a campanha exploratória e, como resultado, foram perfurados sete poços exploratórios (Araujo, 2017).
- 4) Teve início com a criação da Agência Nacional do Petróleo (ANP). A partir de então, a bacia foi ofertada em quatro rodadas de licitação (Ferreira, 2017).

Na Figura 1 abaixo mostra as fases de investimento que a Bacia do Parnaíba sofreu desde o início de sua exploração.

Esforços exploratórios para hidrocarbonetos na Bacia do Parnaíba: 4 fases principais

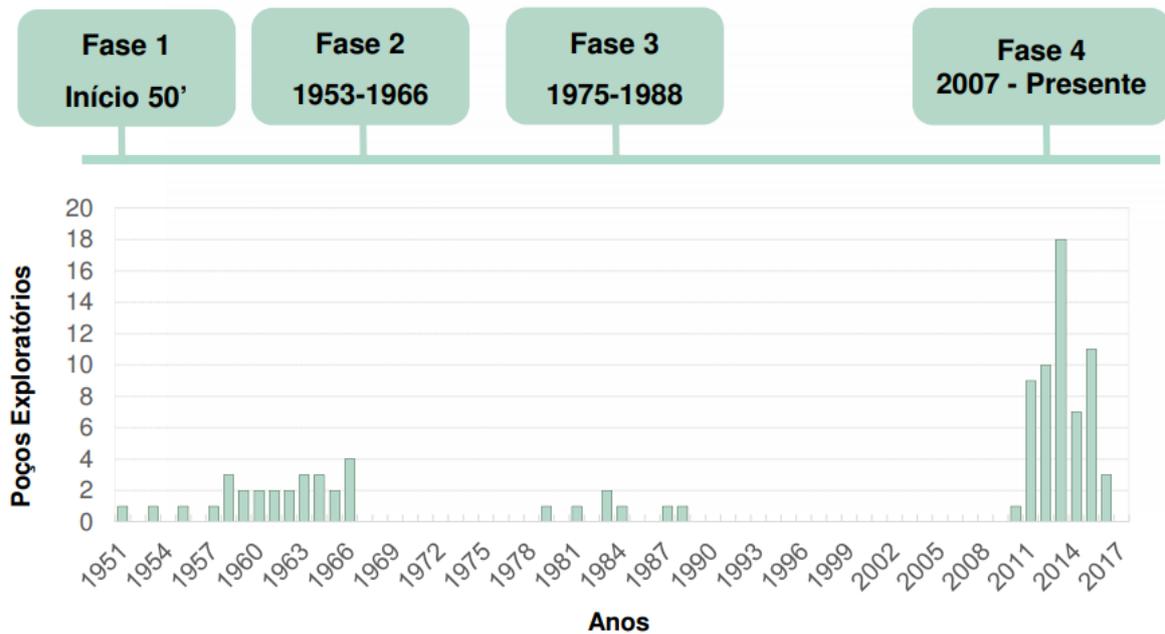


Figura 1: Gráfico do histórico exploratório em termos de poços perfurados na Bacia do Parnaíba desde a década de 50 até o presente. Fonte: Ferreira (2017)

Segundo a ANP, a Bacia do Parnaíba possui 28 blocos na etapa de exploração, três campos na fase de desenvolvimento e cinco campos de produção. Atualmente a bacia corresponde a 7% da produção de gás natural no Brasil, tornando-a a 2ª maior produtora de gás em terra (ANP, 2019; Ferreira 2017).

2 ÁREA DE ESTUDO

Antigamente era identificada como Bacia do Maranhão, Bacia do Meio-Norte, Parnaíba-Grajaú ou do Piauí-Maranhão, é atualmente um dos principais polos de produção de gás no Brasil, por consequência seu interesse de exploração vem crescendo com o passar dos anos.

A Bacia do Parnaíba possui um formato elipsoidal orientado no sentido NE-SW a Bacia do Parnaíba apresenta cerca de 1000 Km de alongamento e atinge aproximadamente 800 Km de eixo e no sentido transversal (Vaz *et al.*, 2007). Limita-se ao norte pelo Arco Ferrer-Urbano Santos, separando-a das Bacias de São Luiz/Grajaú e Barreirinhas; a noroeste é limitada pelo Arco do Tocantins, onde faz

fronteira com a Bacia do Marajó e o Cráton Amazônico; a sudeste é dividida pelo Arco de São Francisco, da Bacia de São Francisco; e por fim, a leste, é limitada pela Província Borborema (Góes, 1995) (Figura 2).

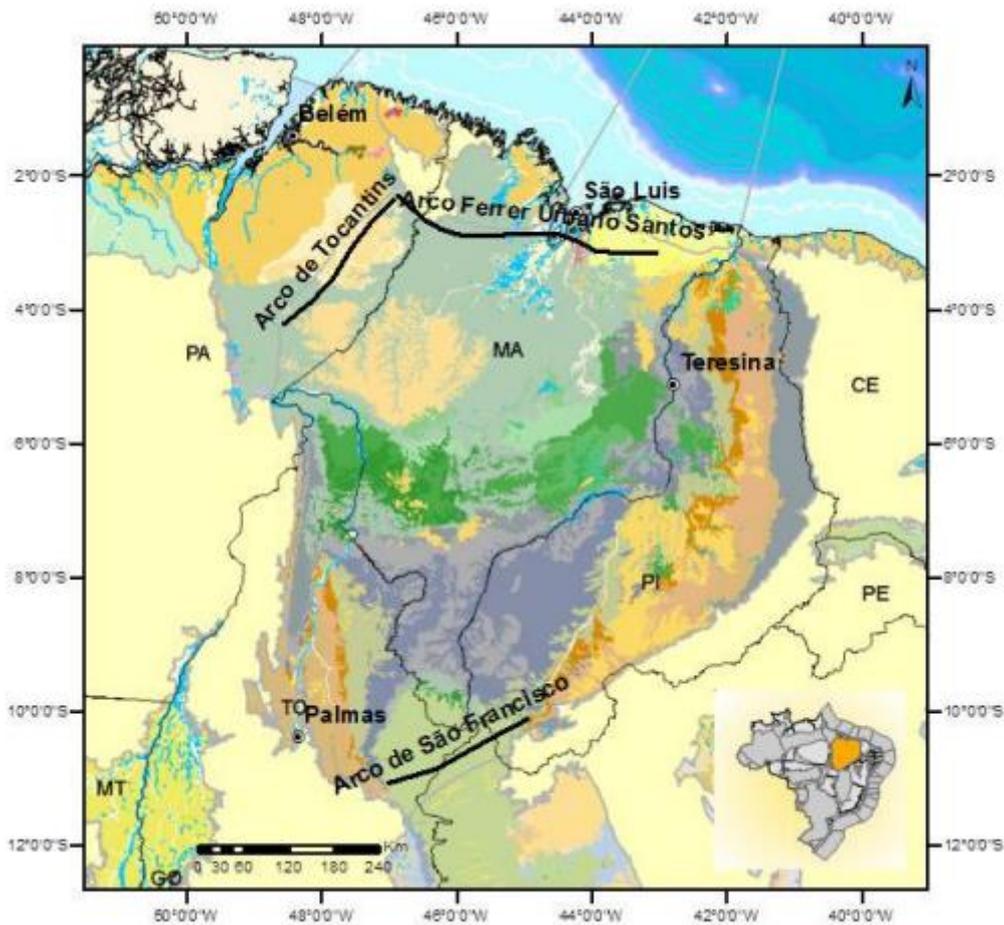


Figura 2: Bacia do Parnaíba e seus principais limites tectônicos. Fonte: Fernandes (2011)

O Parque dos Gaviões consiste em sete blocos exploratórios, sendo chamados de Gavião Branco, Gavião Caboclo, Gavião Real, Gavião Branco Norte, Gavião Azul, Gavião Preto e Gavião Vermelho, como visto na Figura 3 abaixo:

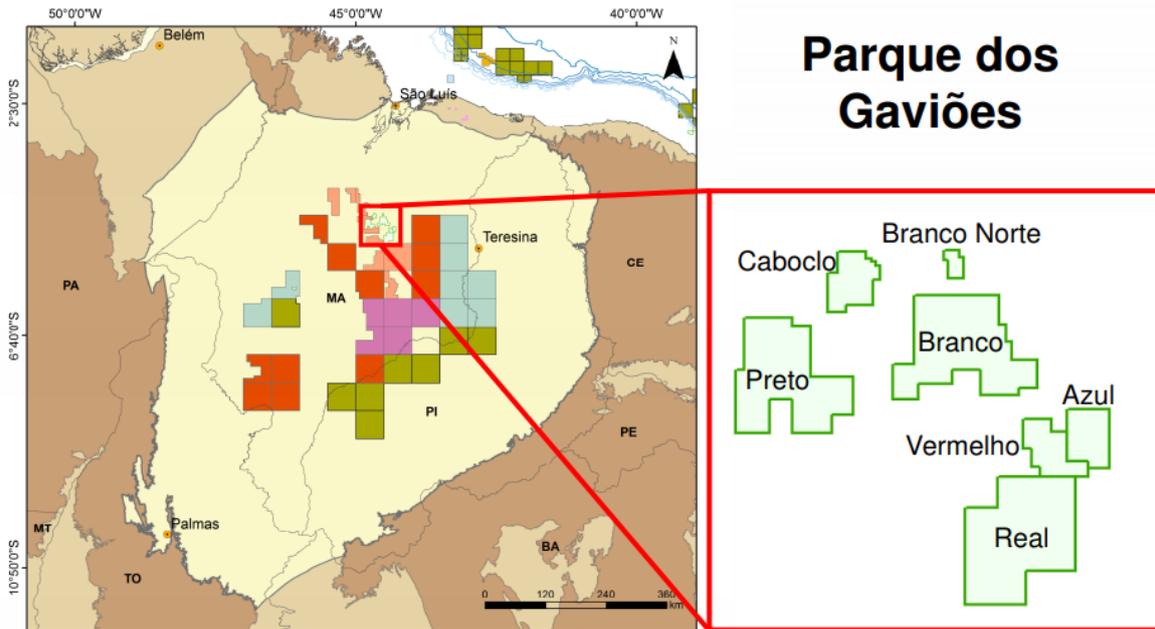


Figura 3: Mapa de localização dos 5 campos de produção na área conhecida como Parque dos Gaviões, centro-norte da Bacia do Parnaíba. Fonte: Ferreira (2017).

2.1 Embasamento

A Bacia do Parnaíba tem a sua gênese associada ao estágio de estabilização da Plataforma Sul-Americana (Almeida e Carneiro, 2004 *apud* Vaz *et al.*, 2007). O embasamento continental decorre dos litotipos presentes nas faixas de dobramento, maciços medianos e outras entidades complexas situadas nas bordas ou proximidades da bacia. Assim, observa-se no substrato da bacia rochas metamórficas, ígneas e sedimentares cujas idades abrangem um intervalo do Arqueano ao Ordoviciano (Figura 4). De acordo com Almeida e Carneiro (2004 *apud* Vaz *et al.*, 2007), a origem e a subsidência da Bacia do Parnaíba podem estar ligadas às deformações e eventos térmicos fini e pós-orogênicos no Ciclo Brasileiro ou ao estágio de transição da Plataforma.

Com base em estudos de sísmica, gravimetria e magnetometria de Oliveira e Mohriak (2003 *apud* Vaz *et al.*, 2007), estruturas grabeniformes interpretadas no substrato da Bacia do Parnaíba teriam controlado o depocentro inicial. Os riftes precursores da bacia, seriam correlacionáveis ao Gráben Jaibaras e também com Jaguarapi, Cococi e São Julião, situados na Província Borborema, que foram gerados do final do Proterozoico até o início do Paleozoico.

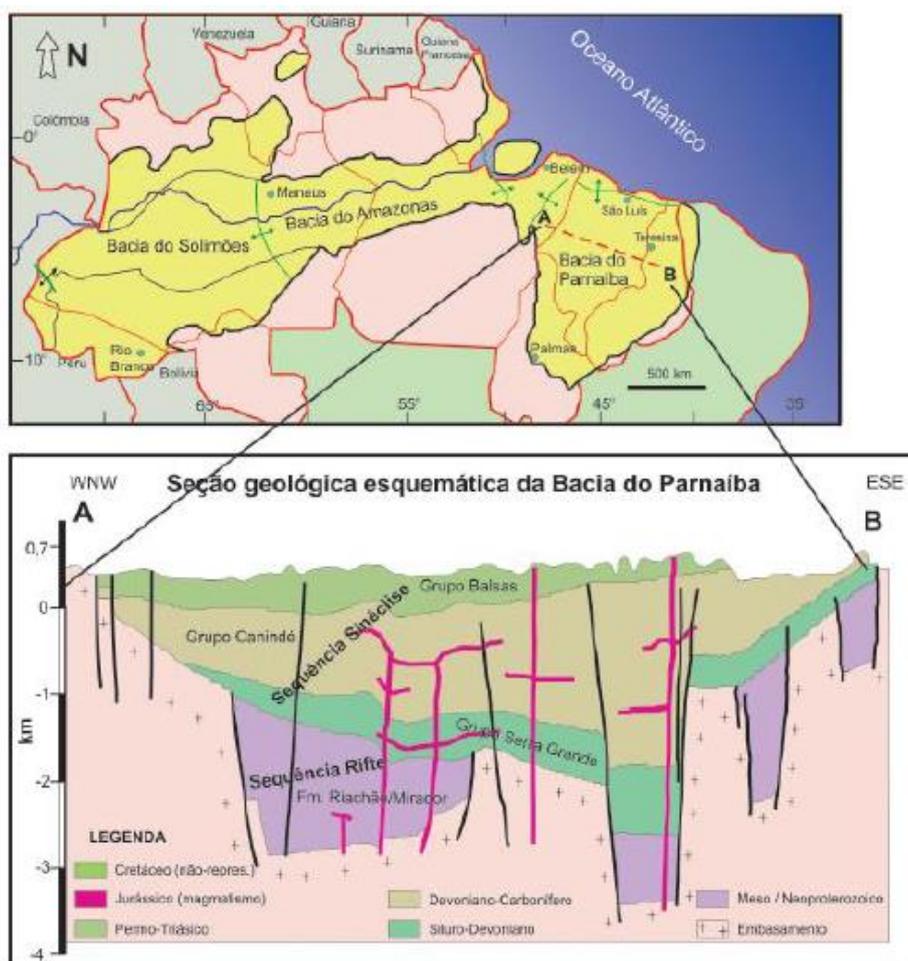


Figura 4: Seção Geológica WNW-ESSE representando o arcabouço estrutural da Bacia do Parnaíba e seu preenchimento sedimentar. Fonte: Hasui (2012) *apud* Nobre (2019).

2.2 Evolução Tectonoestratigráfica

De uma maneira geral, em estudos preliminares baseados em dados gravimétricos, é sugerido que a evolução tectônica da Bacia do Parnaíba se deu em processos de *underplating*, onde foi desenvolvida uma crosta com densidade anômala subjacente à bacia (CPRM, 1995). A ocorrência desse *underplating* e estruturas grabeniformes precursoras, combinadas com uma subsidência termal, teriam sido uns dos principais mecanismos formadores da bacia.

De acordo com estudos realizados por Souza (CPRM, 1995), modelagens termodinâmicas indicam que a subsidência regional se deu no início do Neoproterozoico e perdurando até o Ordoviciano Superior, se dando em pulsos

intermitentes e, de acordo com o autor, esses pulsos foram presentes até o Mesozoico, quando a abertura do Atlântico interrompeu o processo.

Foram muito importantes para a história tectonoestratigráficas da bacia também os lineamentos Pico-Santa Inês, Marajó-Parnaíba e a Zona de Falha Transbrasiliana, vitais para o desenvolvimento da bacia, não somente em sua fase inicial, mas até pelo menos o Eocarbonífero, onde controlaram as direções dos eixos deposicionais por todo esse período (Vaz *et al.*, 2007). A partir do Eocarbonífero o eixo deposicional se deslocou para o centro da bacia e a sedimentação passou a ter um padrão concêntrico de forma ovalada, típica de sinéclise interior (Vaz *et al.*, 2007).

A Bacia do Parnaíba é formada por uma sucessão de rochas sedimentares e ígneas que na maior parte de sua extensão são delimitadas por discordâncias. Nesse sentido é possível dividir a bacia em cinco Supersequências (Vaz *et al.*, 2007): Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea (Figura 5).

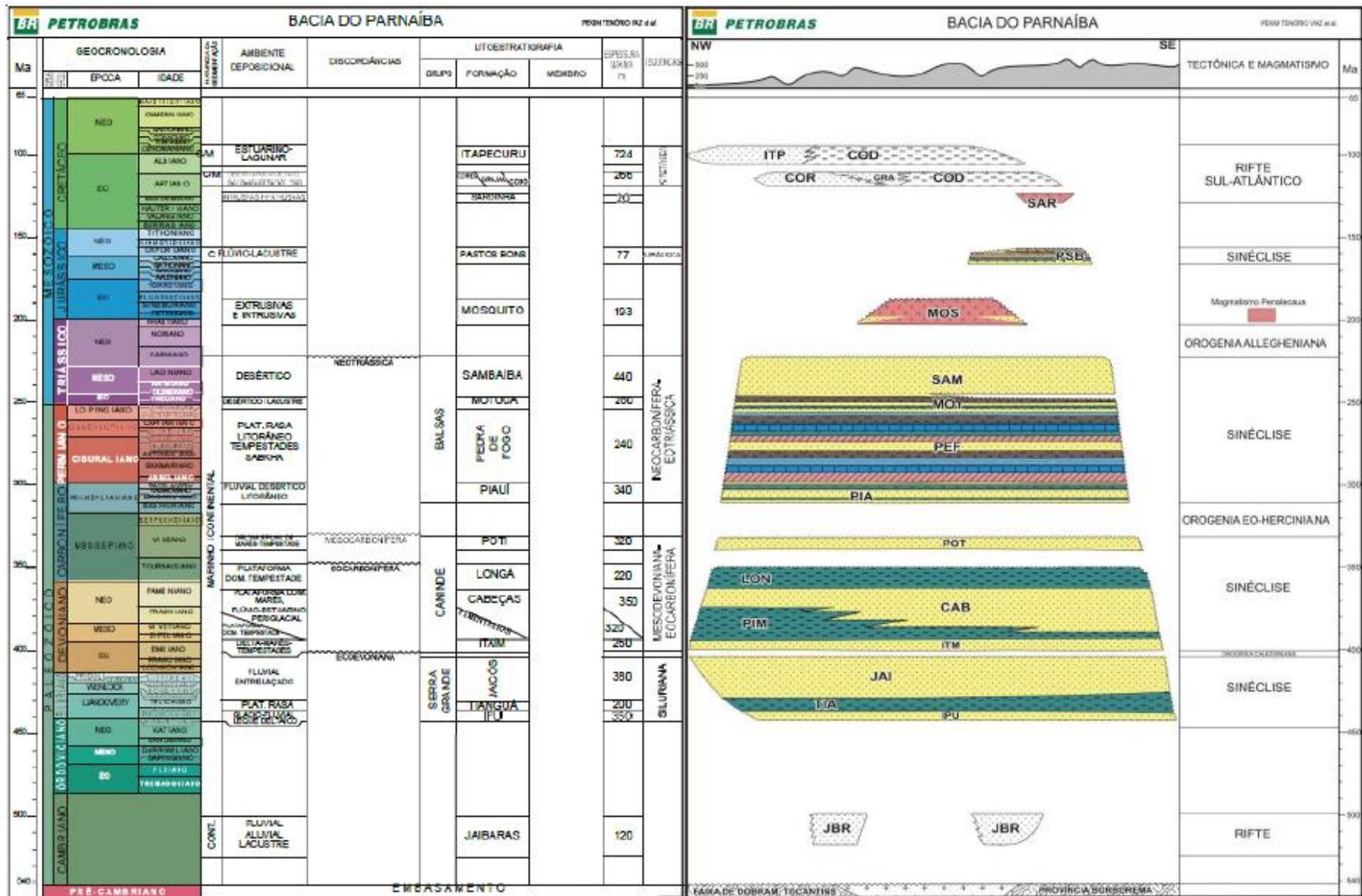


Figura 5: Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba. Fonte: Vaz et al. (2007).

❖ Sequência Siluriana

Correspondendo litoestratigraficamente ao Grupo Serra Grande definido por Small (1914 *apud* Góes e Feijó, 1994), está depositado em contato direto com o embasamento. Caputo & Lima (1984, *apud* Góes e Feijó, 1994) redefiniram essa subdivisão em três formações geológicas.

Primeiramente a Formação Ipu, que é datada como Eosiluriana (Landoveriano); possui contato direto com o embasamento e designa principalmente arenitos hialinos, de granulometria média a grossas, de origem fluvial anastomosada e raramente siltitos, folhelhos e diamictitos. De acordo com o autor, as rochas depositadas durante esse período possuem características de paleoambientes glacial proximal e glacio-fluvial a leques ou frentes deltaicos e sua máxima espessura é de 350 m (Caputo & Lima, 1984 *apud* Góes e Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007).

Sotoposta à Formação Jaicós e sobreposta à Formação Ipu está a Formação Tianguá com contatos concordantes entre si (Caputo & Lima, 1984 e Rodrigues, 1967 *apud* Góes e Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007). Reúne principalmente folhelhos cinzas, siltitos e arenitos muito micáceos. Nessa unidade, as rochas foram depositadas em um ambiente de plataforma rasa, e além disso possui uma espessura máxima de 250 metros (Góes e Feijó, 1994).

❖ Sequência Mesodevoniana – Eocarbonífera

Também denominado como Grupo Canindé (Rodrigues, 1967 *apud* Góes e Feijó, 1994), essa sequência litoestratigráfica foi subdividida por Caputo (1984) em quatro formações: Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti.

A Formação Itaim (Kegel, 1953 *apud* Góes e Feijó, 1994) é composta por arenitos esbranquiçados e finos e folhelhos cinza. Acredita-se que a camada foi depositada em um sistema deltaico e plataformar dominado por correntes induzidas por processos de tempestade de maré (Góes e Feijó, 1994).

A Formação Pimenteiras (Small, 1914 *apud* Góes e Feijó, 1994), é composta por espessas camadas de folhelho cinza e preto, ricos em matéria orgânica (Góes e Feijó, 1994). Vaz *et al.* (2007) definiu essa unidade como ambiente de plataforma rasa dominada por tempestade.

Em seguida, a Formação Cabeças (Plummer, 1946 *apud* Góes e Feijó, 1994), consiste em arenitos finos, bem selecionados, depositados em ambiente nerítico plataformar sob ação predominante de correntes induzidas por processo com influência de maré (Della Fávera, 1982; Freitas, 1990 *apud* Góes e Feijó, 1994).

A Formação Longá (Albuquerque e Dequech, 1946 *apud* Góes e Feijó, 1994) consiste litologicamente em folhelhos e siltitos cinzas e arenitos brancos, finos e muito argilosos (Góes e Feijó, 1994). De acordo com Lima e Leite (1978, *apud* Vaz *et al.*, 2007), em sua porção média apresenta-se comumente pacotes de arenitos e siltitos cinzas esbranquiçados e laminados. Na sua interpretação paleoambiental Góes e Feijó (1994) interpretaram como um ambiente nerítico dominado por tempestades.

Por fim, a Formação Poti (Paiva, 1937 *apud* Góes e Feijó, 1994) é composta por arenitos cinza-esbranquiçados, intercalados e interlaminados por folhelhos e siltitos (Góes e Feijó, 1994). Lima e Leite (1978, *apud* Vaz *et al.*, 2007) interpretam como uma sucessão de estratos que podem ser divididos em duas porções, onde no intervalo inferior são encontrados arenitos cinza-esbranquiçados e na parte superior arenitos cinzas com eventuais níveis de carvão e ambas as porções possuem lâminas dispersas de folhelho e siltito. Logo, a interpretação Paleoambiental dada por Góes e Feijó (1994) foi de um ambiente deltaico e planície de maré sob a influência ocasional de tempestades.

❖ Sequência Neocarbonífera – Eotriássica

Também conhecido como Grupo Balsas, nome proposto por Góes *et al.* (1992), essa sequência é sobreposta em contato discordante ao Grupo Canindé. A Sequência Neocarbonífera-Eotriássica é composta pelas Formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba (Góes *et al.* 1992).

A primeira a ser depositada foi a Formação Piauí (Small, 1914 *apud* Góes e Feijó, 1994), composta por arenitos cinza-esbranquiçados, predominantemente finos a médios e bem selecionados e eventualmente conglomeráticos, além de folhelhos vermelhos e calcários esbranquiçados. Acredita-se que essas rochas foram depositadas em um ambiente continental e litorâneo com condições de aridez. Sua espessura máxima é de 350 m (Góes e Feijó, 1994).

Em seguida tem-se a Formação Pedra de Fogo de idade eopermiana (Plummer, 1946 *apud* Góes e Feijó, 1994). É caracterizada pela presença de sílex e calcário oolítico e pisolítico creme e branco, eventualmente estrimatolítico, intercalado com arenitos finos a médios amarelados, folhelhos cinzentos e anidritas brancas. Estima-se que sua espessura máxima é de 250 m e o ambiente deposicional foi nerítico raso a litorâneo com planícies de *sabka* (Góes e Feijó, 1994).

A Formação Motuca (Plummer, 1946 *apud* Góes e Feijó, 1994) é caracterizada por siltitos avermelhados e marrons e a presença de arenitos brancos de granulometria variando de fina a média, anidrita branca e raros calcários que foram depositados em um ambiente continental desértico controlado por sistemas lacustres. Possui espessura máxima de 280 m (Góes e Feijó, 1994).

Por fim, a Formação Sambaíba (Plummer, 1946 *apud* Góes e Feijó, 1994) consiste em arenitos róseos e amarelos, médios a finos, bem selecionados, bimodais, com estratificação cruzada de grande porte, depositado por sistemas eólicos em ambientes desérticos. Essa formação pode atingir uma espessura máxima de 440 m (Góes e Feijó, 1994).

❖ Sequência Jurássica

Correspondente ao Grupo Mearim, que foi denotado inicialmente por Lisboa (1914), inicialmente foi definida pelas Formações Mosquito, Pastos Bons e Corda, porém, atualmente, Vaz *et al.* (2007) definiu para essa sequência somente a Formação Pastos Bons, visto que a Formação Corda foi reinterpretada e definida como parte da Sequência Cretácea.

A Formação Pastos Bons é datada, com base no seu conteúdo fossilífero, como de Jurássico Médio (Vaz *et al.*, 2007), e pode ser dividida em três partes de acordo com Vaz *et al.* (2007). Em sua base há a presença predominante de arenitos brancos ou com tonalidade esverdeada e amarelada, de granulometria fina a média, grãos subarredondados e, geralmente, apresentam estratificação paralela e raras lentes de calcário. Na parte média da seção ocorrem siltitos, folhelhos/argilitos cinza a verdes, comumente intercalados com arenitos. A porção mais superior é formada de arenitos vermelhos/cor-de-rosa, finos, gradando para siltitos, contendo níveis de folhelho (Caputo, 1984 *apud* Vaz *et al.*, 2007). De leste a oeste, a Formação Pastos Bons jaz

discordantemente sobre as Formações paleozoicas Poti, Piauí, Pedra de Fogo e Motuca (Lima e Leite, 1978 *apud* Vaz *et al.*, 2007). Sugere-se com as interpretações desses dados que a Formação Pastos Bons foi depositada em paleodepressões continentais, lacustrinas, com alguma contribuição fluvial, em clima semi-árido a árido (Vaz *et al.*, 2007).

❖ Sequência Cretácea

É a última sequência depositada na Bacia do Parnaíba e registra a ruptura da margem equatorial brasileira causada pela abertura do Oceano Atlântico no Neocomiano (Góes e Feijó, 1994). Essa sequência é constituída pelas Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru (Góes e Feijó, 1994).

A Formação Corda é designada essencialmente por arenitos vermelhos, castanho-avermelhados, muito finos/finos e médios, seleção regular a boa, semifriáveis a semicoesos, ricos em óxidos de ferro e zeólitas. É deduzido que essa unidade foi depositada em um sistema desértico (Vaz *et al.*, 2007). Todavia, o modelo de Vaz (2007) sobre a Formação Corda é contestado, alguns autores como Nogueira *et al.* (2021), Cardoso *et al.* (2020), Rabelo *et al.* (2019), Rabelo e Nogueira (2015); Ballén *et al.* (2013) contestam esse modelo, afirmando que a formação corda faz parte da sequência Jurássica.

A Formação Grajaú (Rezende ,2002 *apud* Vaz *et al.*, 2007) é representada pelas rochas aflorantes nas cercanias da cidade homônima – arenitos creme-claro/esbranquiçados, creme-amarelados ou variegados, médios/grossos, subangulosos/angulosos, mal selecionados, sendo comum a presença de seixos e de níveis conglomeráticos. Eventualmente observam-se camadas de arenitos finos/muito finos e de pelitos (Vaz *et al.*, 2007).

A Formação Codó é basicamente composta por folhelhos pretos, arenitos, carbonatos e anidritas. A interpretação dada para essa formação é de que foi depositada em ambiente lacustre fechado e evoluiu para um ambiente lacustre aberto com influência marinha no topo, acima de um nível correlacionável de gipsitas (Mendes, 2007 *apud* Nobre, 2019).

Por fim, no Grupo Itapecuru, de idade Mesoalbian-Neocretáceo, os depósitos mostram uma natureza transgressiva, e o litotipo mais freqüente é formado de

arenitos variegados, finos, friáveis, com estruturas diversas, por exemplo, estratificações cruzadas *swaley*, *hummocky*, acanalada, tabular, *mud couplets* e escorregamento de massa. Pelitos e arenitos conglomeráticos ocorrem subordinadamente (Anaisse Junior *et al.*, 2001 *apud* Vaz *et al.*, 2007).

❖ Rochas Magmáticas

De acordo com Góes *et al.* (1992), a Bacia do Parnaíba sofreu três pulsos magmáticos principais de rochas básicas intrusivas e extrusivas, com idade variando entre 215 a 110 M.a. Duas unidades estratigráficas associadas aos eventos magmáticos foram individualizadas, sendo ambos eventos extrusivos. Essas formações são denominadas Formação Mosquito e Formação Sardinha (Góes e Feijó, 1994).

A Formação Mosquito (Aguiar, 1971, *apud* Vaz *et al.*, 2007) tem idade Eojurássica, e é definida por basaltos pretos, amigdaloidal, toleítico, eventualmente intercalados a arenitos vermelhos com leitos de sílex, posicionados entre os grupos Balsas e Mearim. Esse evento está relacionado ao magmatismo Penatecaua das Bacias do Solimões e Amazonas (Góes e Feijó, 1994).

A Formação Sardinha (Aguiar, 1971, *apud* Vaz *et al.*, 2007), de idade Eocretácea, é designada por basaltos pretos, amigdaloidal, sobreposto ao grupo Mearim e sotoposto à sequência cretácea. O magmatismo dessa formação é correlacionado à Formação Serra Geral da Bacia do Paraná (Góes e Feijó, 1994).

2.3 Geologia Local – Formação Codó

De acordo com Vaz *et al.* (2007), a Formação Codó foi depositada entre os períodos do Neoptiano/Eoalbiano, e está inserida na Supersequência Cretácea da Bacia do Parnaíba, além disso estima-se que a formação abrange uma área de 170.000 km², com espessura máxima de 180 m (Lima e Leite, 1978).

A Formação Codó consiste em arenitos, folhelhos, calcários e evaporitos de ambientes marinho raso, lacustre e fluvio-deltaico (Mendes e Truckenbrodt, 2009) e foi depositada a partir do processo de abertura do Oceano Atlântico Sul onde ocorreu

a separação dos continentes Sul-Americano e Africano (Góes e Rossetti, 2001 *apud* Bastos *et al.*, 2014).

Inicialmente, Mesner e Wooldridge (1964) dividiram a Formação Codó em três membros.

- 1) A Unidade Inferior, rica em folhelhos pretos, betuminosos e com intercalação delgada de calcários e altamente fossilífera, além da presença frequente da anidrita.
- 2) A Unidade Média, onde era mais notável a presença de arenitos brancos esverdeados, tipicamente angulares, micáceo e porosos.
- 3) Por fim a Unidade Superior, marcada pela presença de folhelhos cinzas a cinza esverdeados e com a presença proeminente de gastrópodes marinhos.

A partir desses dados, foi interpretado que o membro inferior estaria correlacionado a um ambiente lagunar e marinho restrito; o membro médio a um ambiente fluvio-deltaico; e o membro superior teria origem lacustre com um evento transgressivo na base. Rodrigues (1995), de acordo com algumas análises químicas e geoquímicas, dividiu a Formação Codó em cinco intervalos quimioestratigráficos, onde as interpretações paleoambientais e a composição química da matéria orgânica permitiram essa subdivisão (Figura 6);

- 1) Para o Intervalo 1, localizado na base da formação, foram identificados baixos teores de carbono orgânico e a predominância de matéria orgânica derivada de vegetais superiores. Evidências paleontológicas e biomarcadores indicam a existência de um ambiente marinho, variando de salino a salobro;
- 2) O Intervalo 2, diferentemente do seu antecessor, possui altos teores de carbono orgânico além da composição mais lipídica da matéria orgânica, que sugeriria um ambiente de sedimentação mais restrito, disaeróbico à anóxico;
- 3) O Intervalo 3, assim como o Intervalo 2, também possui altos teores de carbono orgânico e composição da matéria orgânica predominantemente lipídica, sugerindo um ambiente predominantemente anóxico. Além disso, esse intervalo representa o máximo de transgressão marinha durante a deposição da Sequência Cretácea;

- 4) No Intervalo 4, o ambiente é identificado como hipersalino, predominantemente disaeróbico, devido às características geoquímicas além da presença de camadas de evaporitos no topo do intervalo;
- 5) Por fim, o Intervalo 5, localizado no topo da Formação Codó, possui características muito semelhantes com a do Intervalo 1, com baixos teores de carbono orgânico e a predominância de matéria orgânica derivada de vegetais superiores. E o ambiente deposicional, de acordo também com as evidências paleontológicas e de biomarcadores, seria marinho, variando de salino à salobro.

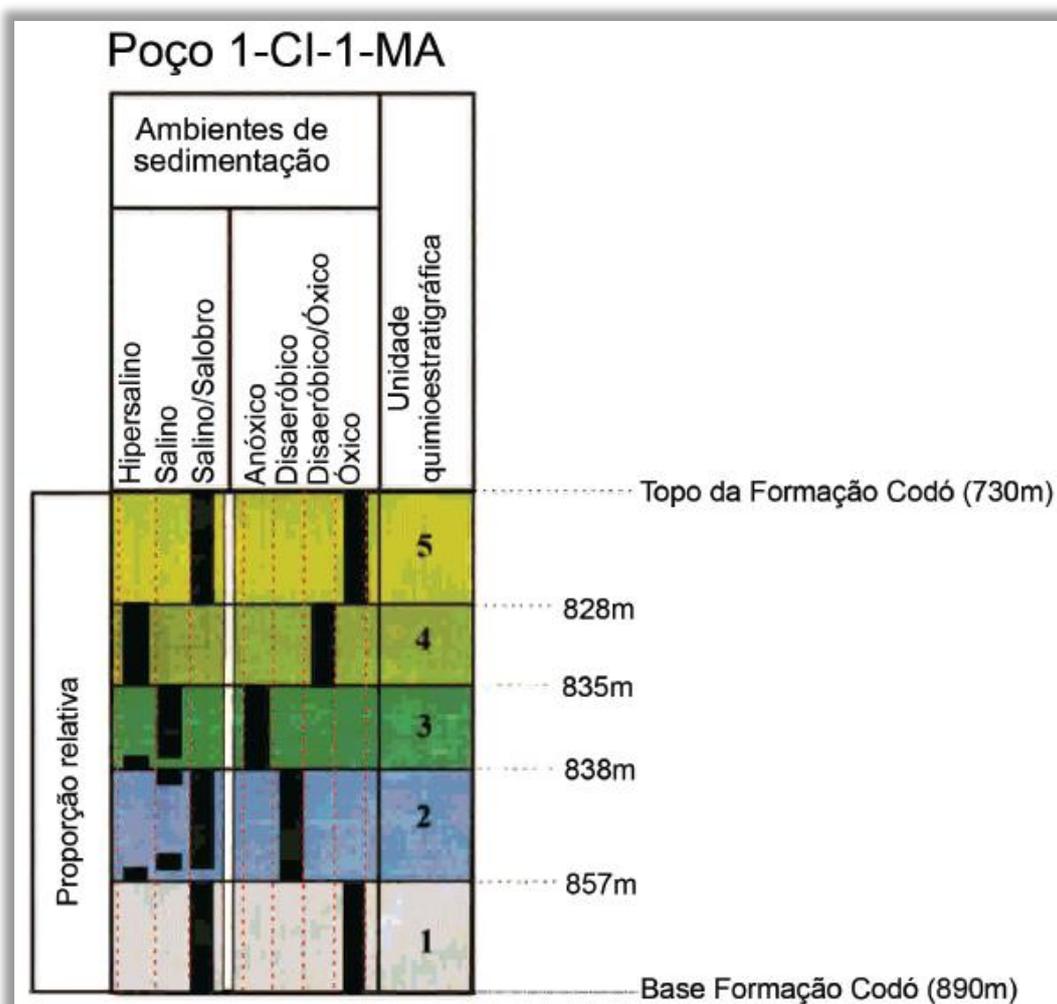


Figura 6: Unidades quimioestratigráficas e evolução paleoambiental proposta por Rodrigues (1995) para a Formação Codó no poço 1-CI-1-MA.

Por outro lado, sob uma ótica estratigráfica e faciológica, foram divididas duas sucessões sedimentares: uma inferior, composta por folhelhos negros betuminosos gradando para calcários e evaporitos, e outra superior, consistindo de intercalações

de pelitos e arenitos de colorações vermelho-chocolate e esverdeada, além de calcários esbranquiçados e acinzentados (Lindoso *et al.*, 2011).

Na primeira sucessão foram interpretadas três associações de fácies: (1) Lago Central; (2) Lago Transicional; (3) Lago Marginal; e na sequência superior foram interpretados ambientes deposicionais correspondentes a *shoreface* superior, laguna/baía interdistributária, lobos de suspensão e canal distributário (Rossetti *et al.*, 2001; Paz & Rossetti, 2001 *apud* Lindoso, 2011).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Amostras de Calha

A perfuração de um poço de petróleo é feita com a ajuda de uma sonda de perfuração e uma broca que tritura a rocha. Depois de trituradas, os fragmentos de rocha carregadas para a superfície pelo espaço anular com a ajuda de um fluido injetado. Após a sua chegada, são lavadas e peneiradas em uma malha de 3 a 2 mm e o material coletado é armazenado em sacos de pano.

Vale a pena ressaltar que essas amostras devem ser usadas com cautela para representações litológicas, haja vista seu intenso contato com a broca e o fluido de perfuração, o qual é formado por complexas misturas de sólidos, líquidos, gases e produtos químicos, assim, elas chegam à superfície frequentemente contaminadas e com suas propriedades alteradas ou mascaradas. Além disso, as amostras definem intervalos – de 3x3 m para zonas de interesse e de 9x9 m para as primeiras fases da perfuração – então o dado não é pontual, porém é representativo estatisticamente no intervalo perfurado e é útil.

3.2 Perfil Geofísico de Raios Gama (GR)

De acordo com Serra (1984), perfis geofísicos de poço nada mais são que a mensuração contra a parede de um poço podendo identificar qualquer uma das características das formações rochosas por meio de um aparelho geofísico de medição, além de auxiliar em um melhor conhecimento das propriedades do reservatório como: porosidade, litologia, argilosidade, permeabilidade, densidade, saturação, etc. (Silva; 2009).

Para lidar com esse problema, os perfis geofísicos de poço começaram a ser utilizados na indústria do petróleo a partir do início do século XX. Nesse sentido, diversos parâmetros de interesse geológico podem ser obtidos sem a necessidade de uma amostragem de rochas, e sim a partir dos equipamentos que são carregados por um cabo pelo poço realizando medidas de propriedades físicas, das quais são inferidas interpretações como: litologia, porosidades, presença de hidrocarbonetos (Serra, 1984).

As medidas são transmitidas pelo cabo para um laboratório na superfície ou uma unidade computacional no caso de perfurações do tipo *wireline* (WL), mas em caso de *logging while drilling* (LWD) a transmissão é feita por telemetria pela lama de perfuração. A gravação desses dados é conhecida como *well-log* (Serra, 1984). Nesse trabalho, foi utilizado um dos perfis básicos para a avaliação dos seis poços: Raios Gama (gAPI). Porém, vale ressaltar que um dos poços estudados não possui os dados de GR.

O perfil de Raios Gama é capaz de identificar a radioatividade natural das rochas e é registrado em graus API (American Petroleum Institute), unidade padrão de radioatividade em estudos petrolíferos onde é a combinação das emissões naturais de raios gama dos elementos potássio (K^{40}), urânio (U^{235}) e tório (Th^{232}), sendo que cada um deles emite uma energia específica, auxiliando na interpretação do tipo de litologia presente na formação.

Segundo Nery (2013), existem três grupos onde as rochas podem ser classificadas de acordo com a sua radiação. O primeiro grupo é das rochas altamente radioativas, o qual inclui folhelhos de águas profundas, folhelhos pretos e betuminosos, evaporitos com alta concentração de potássio, algumas rochas ígneas e metamórficas. O segundo grupo é identificado como rochas moderadamente radioativas, que se refere aos folhelhos e areias argilosas de águas rasas além dos carbonatos e dolomitos argilosos. Por fim, o terceiro grupo é o grupo de rochas de baixa radioatividade, que abarca rochas como evaporitos não potássicos e a grande maioria dos carvões.

Essas concentrações de radioatividade podem acontecer por diversas razões. A primeira possibilidade seria a influenciada pela presença de matéria orgânica na formação, pois organismos, principalmente marinhos, conseguem absorver a radioatividade do meio, criando-se uma relação onde: quanto maior o conteúdo de argila, maior é a radioatividade de uma formação. Argilominerais ricos em tório e

potássio também possuem uma alta alteração nos perfis de GR. Contudo, existem algumas exceções, pois encontram-se conteúdos argilosos onde são extremamente pobres em matéria orgânica e/ou elementos radioativos, além disso, há casos de arenitos com quantidades de feldspato relevantes (arcósios) e o perfil RG isoladamente não pode ser considerado indicador de argila. O feldspato é mineral fonte de potássio, portanto também é emissor de radioatividade, e deve ser levado em conta (Serra, 2004).

3.4 Gamaespectrometria

Para auxiliar os resultados desse trabalho, foram utilizados dados de gamaespectrometria pois, fundamentalmente, esse método é capaz de medir fontes naturais de radiação gama. Essa energia é gerada pela instabilidade dos núcleos dos átomos radioativos, provindos da desintegração natural do potássio (K^{40}), urânio (U^{238}) e tório (Th^{232}) presentes na maioria das rochas, onde, por meio de longas cadeias de produtos derivados, o U^{238} e o Th^{232} decaem para isótopos de chumbo estáveis, já o K^{40} decai em argônio (Figura 7) (IAEA, 2003).

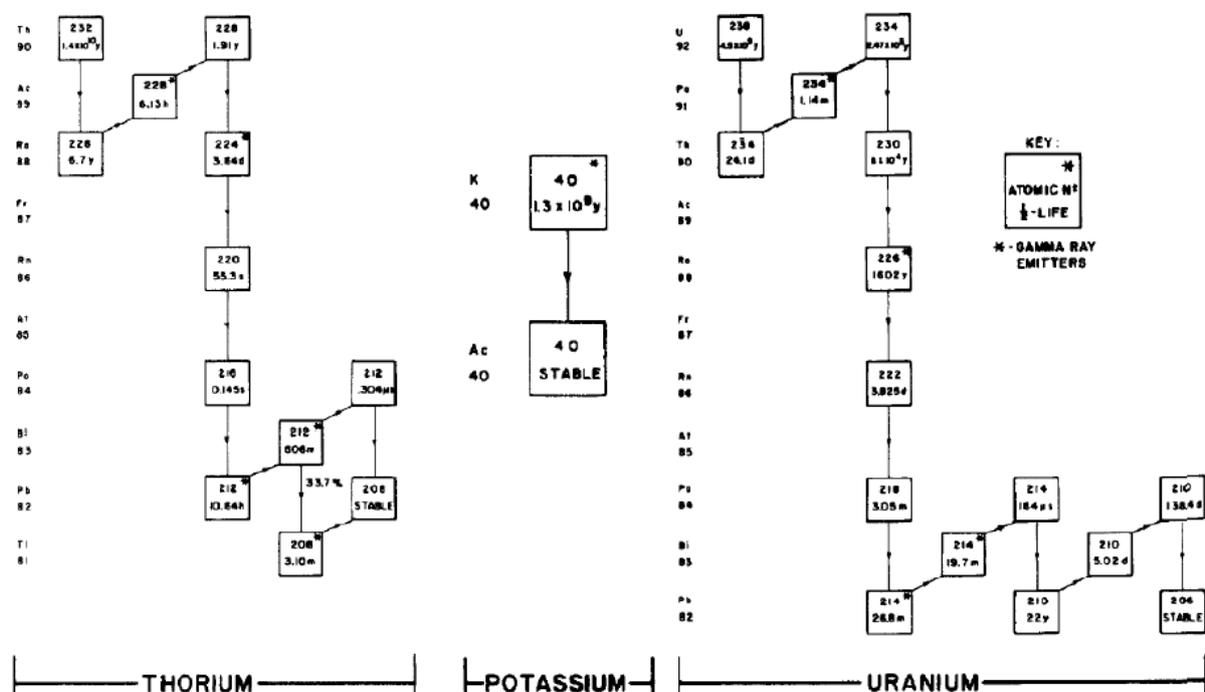


Figura 7: Séries de decaimento do tório, potássio e urânio. Fonte: Serra *et al.* (1980) *apud* Nobre (2019).

O gamaespectrômetro possui um cristal sensível, capaz de identificar a radiação ionizante, de germanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), o qual como detector tornou-se disponível a partir da década de 70. A principal vantagem dele em relação ao perfil de Raios Gama é que esse equipamento tem a capacidade de decompor o seu sinal radioativo, particularizando os valores da contribuição do potássio (K^{40}), Urânio (U^{238}) e Tório (Th^{232}). Logo é muito útil para o auxílio da interpretação litológica, pois ambiguidades da interpretação (Como a presença de um arenito arcossiano) podem ser mais facilmente assimiladas (Serra, 2004).

3.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF)

O EDXRF é uma técnica analítica onde a amostra não tem o seu conteúdo físico-químico alterado e consiste em uma análise do conteúdo elementar, ou seja, esse levantamento consegue identificar concentrações de elementos químicos mais pesados que o sódio (Na), estabelecendo suas proporções. Com essas informações podem ser geradas curvas de algumas razões químicas (Ex: Fe/Ca), que podem ser utilizadas para análises paleoambientais porque o comportamento desses dados sugere um maior aporte continental ou afogamentos. Esse método vem sendo usado a aproximadamente meio século para a caracterização de materiais diversos (Ferreti, 2009).

Esse método envolve basicamente uma fonte de radiação de alta energia (raios-X) que é emitida pelo equipamento e os átomos das amostras são excitados, assim absorvem energia fazendo com que os elétrons migrem para as camadas mais exteriores. Nesse estado, os átomos ficam um estágio mais instável (Figura 8) (Malvern Panalytical, 2019; Massoni, 2009).

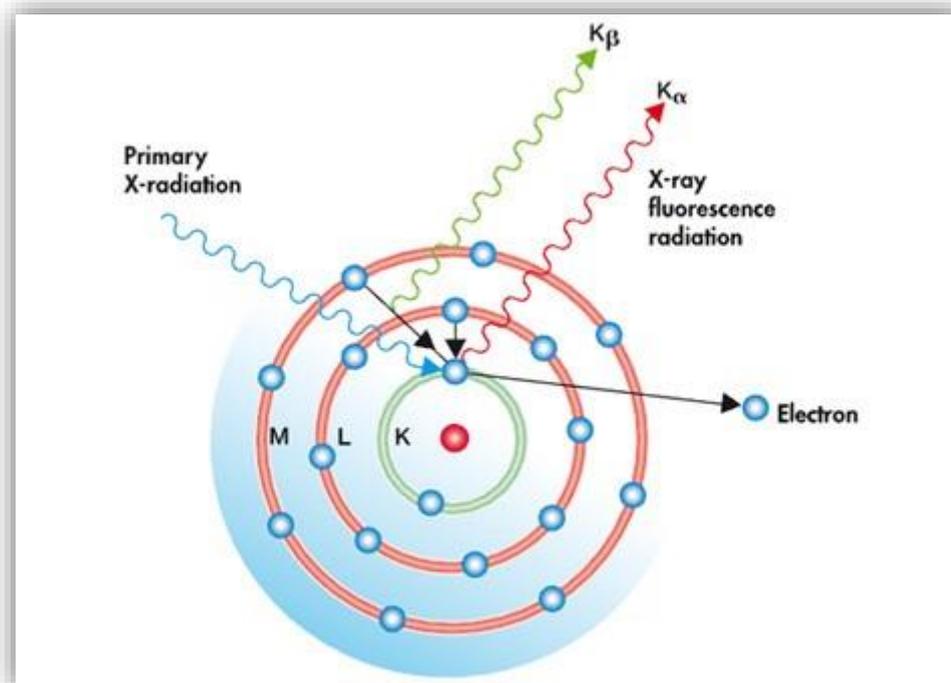


Figura 8: Esquema da ação do EDXRF. Fonte: De Moraes (2014).

No momento em que essa fonte para de irradiar energia, os elétrons que estavam em camadas mais exteriores voltam para suas respectivas posições iniciais retomando a estabilidade do átomo, nesse momento o átomo libera uma certa quantidade de energia, a qual é identificada pelo equipamento, e cada elemento químico libera uma carga de energia diferente.

Dentro do âmbito da instrumentação, o EDXRF pode ser dividido em dois tipos: Os espectrômetros de laboratório e os espectrômetros portáteis, onde o primeiro tende a ter resultados mais precisos. No caso do atual trabalho, foi utilizado um espectrômetro de laboratório que será descrito em detalhes na metodologia. Vale ressaltar que, a natureza das análises no EDXRF é semi-quantitativa, assim, optou-se por uma abordagem qualitativa no uso dos dados, como será visto nos resultados.

Além disso, de acordo com Jenkins (1995), a maioria dos espectrômetros comerciais trabalham em uma faixa de 0.2 a 20 Å (60-0.6 keV) e, devido a esse intervalo, elementos de raio atômico muito pequenos não conseguem ser bem identificados. No aparelho utilizado neste trabalho, elementos com o raio atômico menores que o magnésio (12), não conseguem ser identificados pelo aparelho.

O EDXRF tem como fundamentação teórica a Lei de Moseley (Equação 1) que se trata de uma lei empírica da física experimental onde foi possível descrever uma

relação linear entre a frequência do raio-X característico (f) e o número atômico (Z) ao quadrado.

Lei de Moseley:

$$f = K(Z - \sigma)^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde,

f é frequência do raio-X

Z é o número atômico ao quadrado

K e σ são constantes que variam com a série espectral

Outra propriedade física que influencia na resposta obtida pelo espectrômetro é o comprimento de onda presente na radiação primária (λ) e a composição do espalhamento da matéria (Jekins, 1995). A Figura 9 abaixo demonstra os diversos processos que ocorrem durante a interação do raio-X com a matéria, que está intimamente ligado com a Equação 2, que foi calculada algebricamente a partir da Equação 1.

$$\lambda = \frac{12.398}{E}$$

(Eq. 2)

Onde,

E é a Equação de Conversão da Energia

λ é o comprimento de onda

Fonte: Jekins, 1995

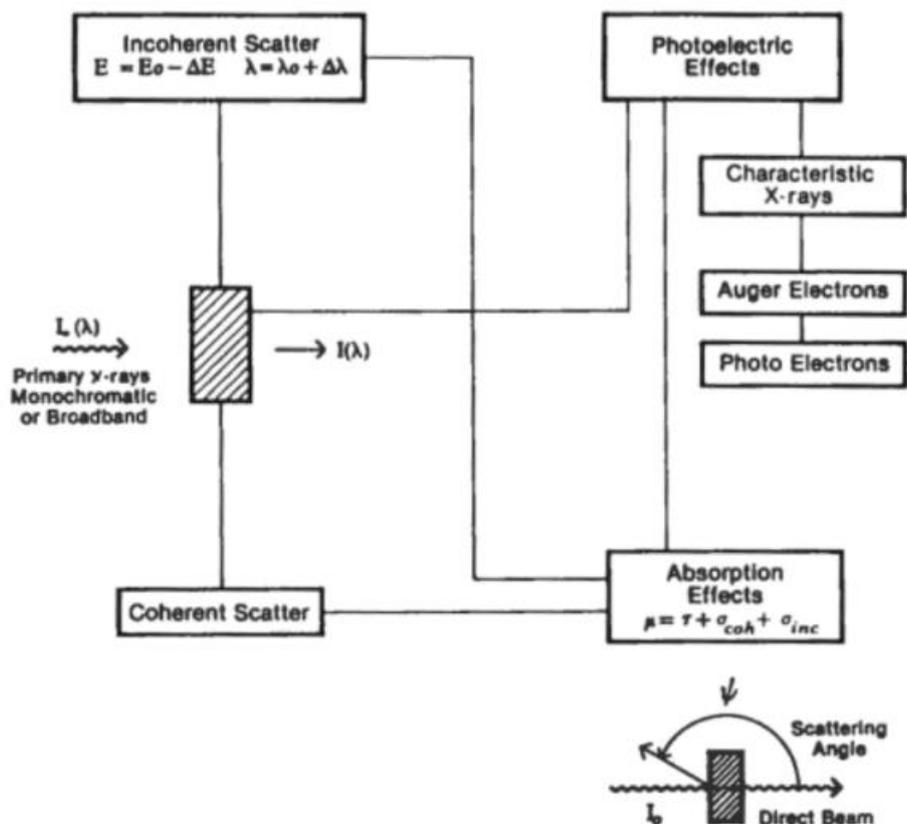


Figura 9: Interação da radiação eletromagnética com a matéria. Fonte: Jenkins, 1995.

3.6 Intemperismo, Erosão, Deposição e Sedimentação

A erosão é um dos principais integrantes do ciclo das rochas, sobremaneira importantes quando está se estudando rochas sedimentares, onde em sua maioria se originam por meio de detritos depositados em regiões mais rebaixadas sobre outras rochas pré-existentes, sejam elas ígneas, metamórficas ou até mesmo sedimentares (Grotzinger J. & Jordan T. ,2013).

Para esses importantes processos ocorrerem, há a necessidade de uma área fonte que esteja em um ponto mais alto do que seu nível de base e de um agente de transporte, que pode ser a água, vento ou a gravidade (Grotzinger J. & Jordan T. ,2013).

De acordo com Grotzinger J. & Jordan T. (2013), os processos superficiais mais importantes para a formação de rochas sedimentares são:

3.6.1 Intemperismo

É o processo pelo qual as rochas são deterioradas na superfície e a partir dessa ação, são geradas partículas sedimentares. Porém outros sistemas podem interagir, além disso, o seu desempenho varia de profundidade de 1 m a até algumas centenas de metros (Ovalle & Aragon, 2008). Vale ressaltar que o intemperismo pode produzir três tipos de materiais (Figura 10): fragmentos não alterados quimicamente (A), minerais novos formados pela transformação pré-existente (B) e substâncias dissolvidas (C).

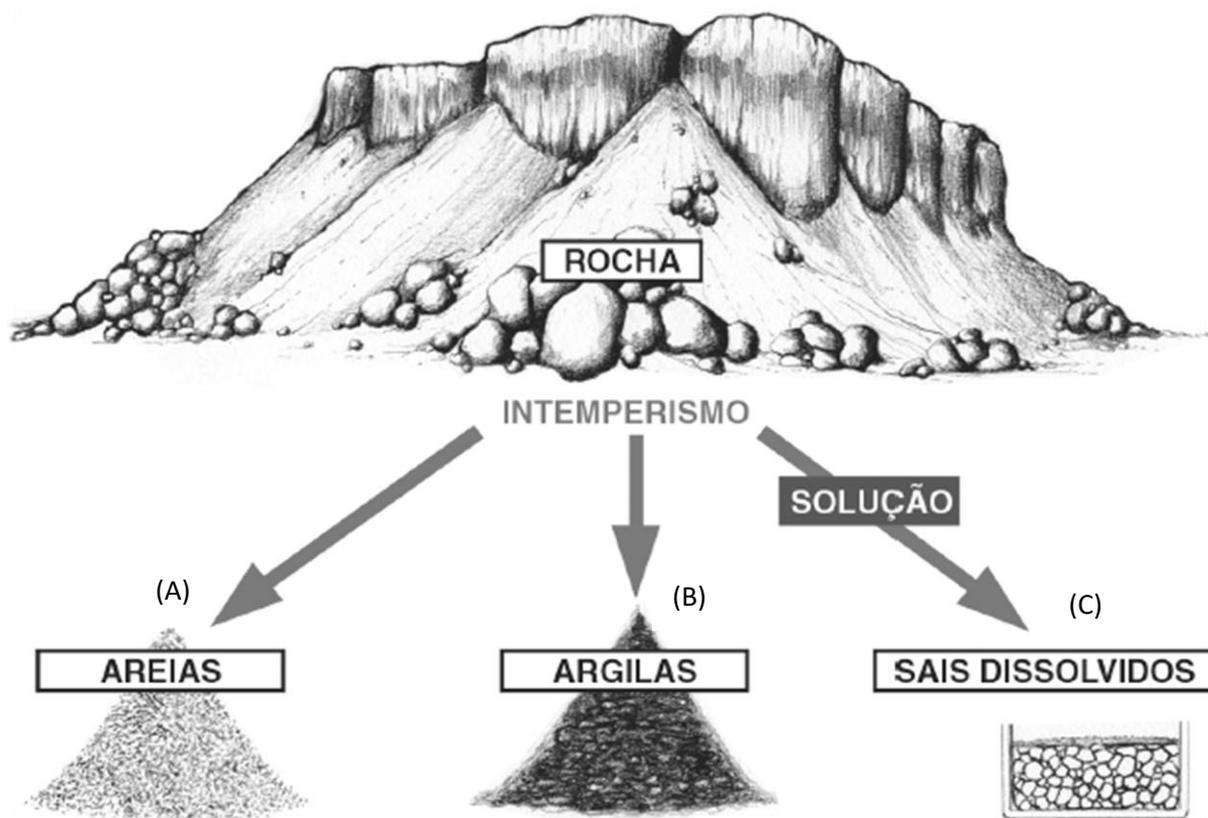


Figura 10: Os principais produtos do intemperismo. Fonte: Modificado de Ovalle & Aragon (2008).

O intemperismo pode ser subclassificado em 2 tipos (Grotzinger J. & Jordan T. (2013):

- Intemperismo físico: onde a rocha é fragmentada por meio de processos mecânicos, os quais não alteram sua composição química. Forças tectônicas e a ação do gelo são grandes exemplos desse tipo de intemperismo, pois as rochas que ocorrem na superfície da Terra são rígidas e ao serem submetidas a essas forças as rochas são fraturadas

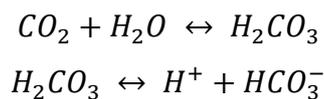
(Ovalle & Aragon, 2008). O congelamento pode também gerar fraturas como a Figura 11 abaixo:



Figura 11: Atuação do gelo no intemperismo. Fonte: Foto de Mark Hambrey (2013) in Grotzinger J. & Jordan T.

Isso ocorre pois quando a água congela, seu volume aumenta cerca de 9% e essa variação de volume tenciona a rocha a qual pode produzir novas fraturas, fragmentando a rocha.

- Intemperismo químico: diferentemente do intemperismo físico, o agente intemperizador é capaz de alterar ou dissolver quimicamente os minerais presentes em uma rocha. Normalmente esse processo está relacionado à água, a qual durante a condensação na atmosfera, entra em contato com o gás carbônico e passa a ficar levemente acidificada, demonstrado na reação abaixo.



Com a presença dos íons H^+ nas águas pluviais, seu Ph diminui, tornando a água levemente acidificada, a qual, no momento em que interage com as rochas, produz substâncias dissolvidas, decompondo cada vez mais a rocha (Ovalle & Aragon, 2008).

3.6.2 Erosão

É o processo que, a partir do momento em que a rocha se encontra intemperizada, as partículas geradas passam a ser transportadas e são afastadas de suas respectivas áreas-fonte, ou seja, seria a remoção física das partículas produzidas pelo intemperismo, onde o agente removedor das partículas pode ser o ar, água, gravidade, entre outros (Ovalle & Aragon, 2008).

3.6.3 Deposição

Também pode ser referido como sedimentação e é o processo onde as partículas são depositadas em regiões abaixo do nível de base. Para a realização desse processo, a topografia e o comportamento do ambiente de sedimentação são de extrema importância, visto que, a tendência é de que regiões mais baixas e com um ambiente relativamente menos perturbado propendem a ter uma taxa de sedimentação mais representativa. Na Figura 12 abaixo é exemplificado alguns tipos de ambientes de deposição.



Figura 12: Representação esquemática dos ambientes deposicionais. Fonte: Grotzinger J. & Jordan T. (2013).

Há também a necessidade da tipificação do sedimento a ser depositado, pois dependendo do ambiente e o tipo de partículas sedimentar, o processo de deposição pode se dar de maneira diferente. Alguns autores dividem o tipo de sedimentos como (Ovalle & Aragon, 2008; Grotzinger J. & Jordan T. ,2013; Garrison T.,2010):

- Sedimento Terrígeno ou Clástico: são partículas depositadas fisicamente e são as mais comuns. Como o próprio nome indica, esse sedimento é originário de continentes e ilhas, a partir principalmente da erosão das rochas continentais, mas também possui contribuição de cinzas vulcânicas e poeira trazida pelos ventos. Esses sedimentos são depositados pela água corrente, pelo vento e pelo gelo, formando camadas de areia, silte e cascalho (Grotzinger J. & Jordan T., 2013; Garrison T.,2010).
- Sedimentos Biogênicos: nos oceanos é o segundo tipo de sedimento mais abundante e sua composição química é geralmente vinculado ao silício ou calcário principal componente desse sedimento tem origem biológica. Grandes exemplos desse tipo de sedimentos são os seres planctônicos, que vivem na superfície da coluna d'água e em sua grande maioria possuem conchas ou esqueletos de proteção e, uma vez mortos, tendem a afundar e acumular sobre o fundo da bacia. Também há a contribuição dos seres bentônicos, que vivem no bentos e são frequentemente encontrados em forma de recifes e conchas (Grotzinger J. & Jordan T.,2013; Garrison T., 2010).
- Sedimentos Hidrogênicos ou Químicos: são sedimentos formados pela precipitação química de minerais a partir de soluções de minerais dissolvidos na coluna d'água. As fontes desses minerais são: rochas submersas e sedimentos, compostos lixiviados da crosta recém-formada, material proveniente das fontes hidrotermais, dentre outros. Normalmente sua deposição é muito lenta, pois há maneiras de deposição mais rápida, como no caso de um lago que seca rapidamente (Garrison T.,2010; Ovalle & Aragon, 2008).

- Sedimentos Cosmogênicos: são sedimentos de origem extraterrestre e são os menos abundantes. Raramente apresentam altas concentrações e provém principalmente de colisões de asteroides no planeta Terra e também de poeira interplanetária, que possui um tamanho equivalente a silte e areia (Garrison T.,2010).

3.6.4 Soterramento

Ocorre à medida que os sedimentos começam a se acumular cada vez mais nas áreas mais baixas e o material começa a ser soterrados em uma bacia e a sofrer compactação.

3.6.5 Diagênese

Após o soterramento, mudanças físicas e químicas começam a ocorrer devido ao aumento de pressão e temperatura à medida que o sedimento vai atingindo maiores profundidades.

Esse processo se dá com o início do soterramento dos sedimentos a partir do momento em que o peso começa a expulsar a água presente no espaço poroso dos sedimentos, com o processo chamado compactação (Garrison T., 2010). Parte da água ficará retida nos poros e interagirá quimicamente com os grãos próximos, dissolvendo os minerais mais solúveis e formando novos minerais com precipitação química. Esses novos minerais formados atuam como um cimento agregando os grãos, formando por fim as rochas sedimentares (Figura 13) (Ovalle & Aragon, 2008).

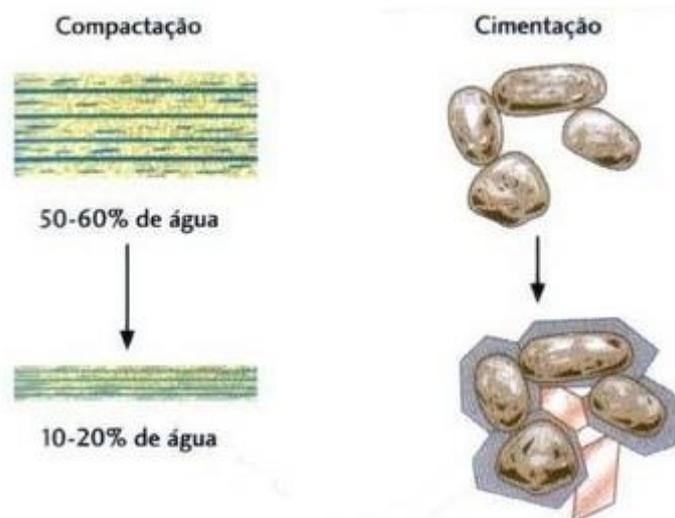


Figura 13: Processos de compactação e cimentação. Fonte: Grotzinger J. & Jordan T. (2013).

A ocorrência desses processos depender é função do clima da região, visto que sua ação é acelerada com o aumento da temperatura, a disponibilidade de água no estado líquido e de ação tectônica recente ou contemporânea à sedimentação, já que a formação ou a manutenção de relevos acidentados favorecem uma maior taxa de erosão (Souza, 2017).

3.7 Proxies Geoquímicos e Estudos Paleoambientais

De acordo com a definição de Killops & Killops (1988), geoquímica é o estudo das composições químicas do planeta Terra, principalmente no quesito de rochas e minerais, e de suas transformações, que podem envolver processos biológicos e/ou químicos.

Segundo Moraes (2016), a análise química das rochas pode ser utilizada como uma importante ferramenta para estudos petrológicos. Os variados elementos químicos demonstram respostas diferentes de acordo com os processos geológicos e, por esse motivo, a alteração de concentrações desses elementos, sejam em rochas ou em sedimentos, podem caracterizar séries magmáticas, condições de metamorfismo ou até mesmo assinaturas de ambientes passados.

Como o foco do trabalho é o estudo paleoambiental, é importante salientar que desde o processo da gênese do sedimento, seja a partir do intemperismo ou de reações químicas e/ou biológicas, vistas anteriormente, todo o curso do mesmo influenciará as concentrações de elementos químicos, e essa assinatura ficará

registrada no momento de ser alterado por deposicionais.

Razões	Óxica	Subóxica	Anóxica
V/Cr ¹	<2,00	2,00-4,25	>4,25
Ni/Co ¹	<5,00	5,00-7,00	<7,00
V/Sc ²	<9,1	x	x

sedimento até o deposição, podendo eventos pós-

Alguns

estudos geoquímicos

mostraram que alguns elementos são costumeiros em depósitos minerais, outros são essencialmente formadores de rochas. Foram respectivamente chamados de: metalogênicos e petrogênicos (Light, 2007 *apud* Ribeiro, 2019).

3.7.1 Elementos Paleoredox

Diversos elementos traços e menores têm a capacidade de acumularem na fase sólida de sedimentos marinhos, resultado da precipitação pós-deposicional ou por absorção da água de fundo ou por pelas águas dos poros (Calvert e Pedersen, 2007). De acordo com Valdés (2004), os estudos desses metais que reagem às condições de oxigenação do meio, também chamados de redox-sensíveis, contribuem muito a respeito da interpretação do estado de oxigenação do ambiente no momento em que o mesmo foi depositado.

Os elementos químicos que são mais comumente utilizados para esse tipo de análise, ou seja, aqueles onde a taxa de acumulação varia de acordo com as condições redox (redução-oxidação) são: Mn, Cr, Mo, Re, U e V (Calvert e Pedersen, 2007; Huang *et al.*, 2020). Esses elementos podem ser divididos em dois grupos principais, onde um deles são afetados pelas condições redox, os quais são altamente solúveis em águas óxicas, mas são reduzidas a espécies reativas ou insolúveis em condições anóxicas, e aqueles que o estado de oxidação não varia de acordo com o potencial redox do ambiente, como o Ag, Cd, Cu, Ni e Zn, os quais formam sulfetos altamente insolúveis (Dias, 2018).

Logo, para a interpretação desse *proxie*, alguns autores (Dias, 2018; Huang *et al.*, 2020; Martinez-Ruiz *et al.*, 2015) utilizam razões elementares como: Mn/Al, V/Cr, V/Al, V/Sc e Ni/Co, onde o seu numerador depende das condições redox do meio e o seu denominador não. Um exemplo de como as razões podem ser utilizadas para classificar um ambiente deposicional está na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Associação de valores das razões elementares e a classe redox no ambiente deposicional (¹ Jones e Manning, 1994; ² Kimura e Watanabe, 2001, *apud* Dias, 2011)

Na Figura 14 é observado um gráfico de elementos como U, V, Mo, Ni e Cu plotados em função do carbono orgânico total (COT). A medida que temos sedimentos onde há uma maior concentração de matéria orgânica, comumente relacionados a sedimentos mais finos, se a concentração desses elementos aumentar, a interpretação gerada é que o ambiente está mais redutor. Todavia, se as concentrações desses metais aumentam e a litologia mostra granulometria mais grossa, ou seja, tem uma menor competência de preservar matéria orgânica, a interpretação gerada é que esses minerais vieram transportados de fora da bacia (Tribovillard *et. al*; 2006).

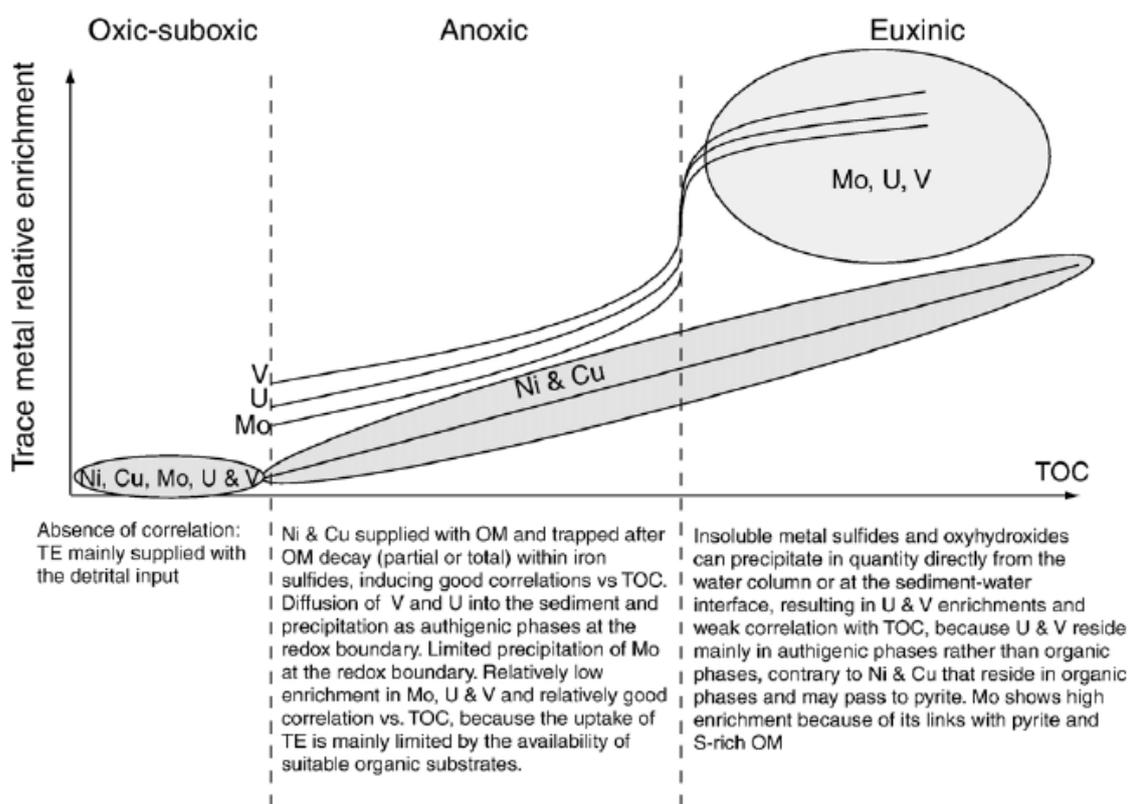


Figura 14: Gráfico de enriquecimento de metais versus COT. Fonte: Tribovillard (2006).

3.7.2 Proxies de Variação de Umidade

O cálcio (Ca) é um metal presente em minerais como calcita e aragonita, encontrado principalmente em sedimentos marinhos. Em contrapartida, o titânio (Ti) e o (ferro) Fe estão relacionados a um conteúdo sedimentar de origem mais continental e em especial a argilominerais (Dias, 2018). Dessa maneira, de acordo com Arz *et al.* (1998), as variações no conteúdo de carbonato e na razão entre os elementos Ti, Fe e Ca são utilizados como indicadores climáticos continentais, ou seja, as razões Fe/Ca e Ti/Ca podem indicar aporte de material terrígeno para os oceanos (Dias, 2018).

Outra razão que pode ser utilizada para detectar a variação do aporte continental, é a razão Rb/Sr. O rubídio (Rb) compõe do grupo IA da Tabela Periódica, referente aos metais alcalinos, e em sua natureza não forma metais próprios, logo ele sempre será encontrado em minerais como impureza, principalmente nos minerais potássicos. Esse comportamento ocorre porque o raio iônico do Rb é muito semelhante ao raio iônico do potássio (K) – sendo que o Rb é cerca de 11% maior do que o K –, logo, esse elemento passa a também ser adsorvido nos argilominerais (Mizusaki, 1992).

O estrôncio (Sr) é um metal alcalino-terroso localizado no grupo IIA da Tabela Periódica. Seu raio iônico é muito próximo do raio iônico do Ca, sendo encontrado em minerais como calcita, apatita e plagioclásio (Mizusaki, 1992).

Dessa forma, a Razão Rb/Sr pode ter uma aplicação semelhante às razões Fe/Ca e Ti/Ca, visto que em condições mais áridas a razão Rb/Sr diminui, devido ao menor intemperismo da rocha fonte (Ribeiro, 2019).

3.7.3 Proxies de Produtividade Marinha

Para o entendimento dos estudos oceanográficos, as características da matéria orgânica depositada no assoalho marinho são de grande importância, visto que seus *proxies* podem indicar diversos processos, como: produtividade de águas superficiais, aporte de materiais continentais, dinâmica de massas de água, potencial de oxirredução e taxas de sedimentação (Dias, 2018).

O carbono orgânico é o principal constituinte dos compostos biológicos, dessa forma, sua concentração no sedimento pode ser utilizada para reconstrução pra produtividade do oceano (Andrade, 2011). Um exemplo é o carbonato de cálcio (CaCO₃), que no sedimento marinho é composto principalmente pelos esqueletos dos

organismos que vivem no oceano e representa cerca de 95% do carbono transferido da água para o sedimento. Dessa maneira, o CaCO_3 tem sido um componente importante para os estudos de paleoprodutividade marinha (Dias, 2018).

Todavia, a dissolução do carbonato pode interferir nos resultados, pois, de acordo com Garrison (1942), vazas calcárias não se acumulam em qualquer lugar do fundo dos oceanos. Em grandes profundidades, o carbonato de cálcio é dissolvido pela água do mar, uma vez que, há mais dióxido de carbono dissolvido em águas profundas, tornando-as levemente ácidas. Essa acidez junto com a alta pressão e as baixas temperaturas auxiliam a acelerar a dissolubilização do CaCO_3 . Em uma determinada profundidade denominada CCD (*calcium carbonate compensation depth*), a taxa de sedimentação é igual à taxa de dissolução (Figura 15).

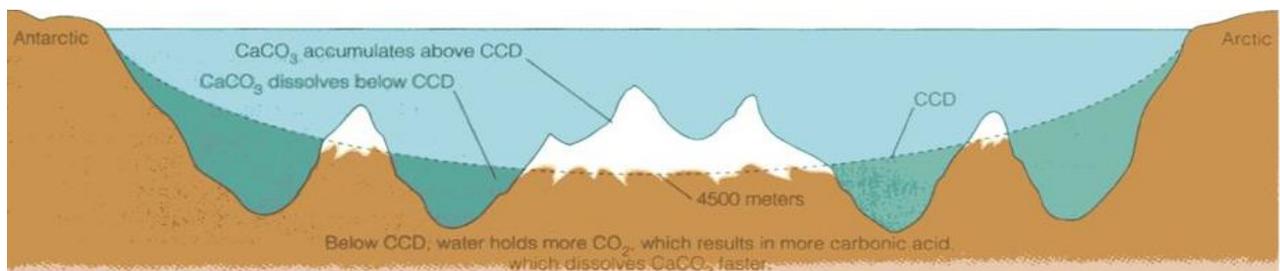


Figura 15: A linha pontilhada mostra a profundidade de compensação de carbonato de cálcio (CCD). Nessa profundidade de aproximadamente 4500 m, a taxa de acúmulo de CaCO_3 é igual à sua taxa de dissolução (Garrison, 2010).

3.7.4 Proxies de Salinidade

De acordo com autores como Parente (1998), Bahr (2008) e Rush (2010), existem diversos *proxies* geoquímicos capazes de identificar a salinidade no meio a partir do estudo dos elementos como o Mg, Sr e Ca. Em momentos onde o clima está mais seco, a água é enriquecida em carbonatos e empobrece em Ca, e elementos como o Sr e o Mg são somados à medida que a salinidade aumenta. Com isso, as razões Mg/Ca e Sr/Ca podem ser utilizadas como indicadores de salinidade.

3.7.5 Proxies Gamaespectrais

O gamaespectrômetro é um aparelho comumente utilizado para medir a radioatividade total e os conteúdos de urânio, potássio e tório, dos quais são elementos muito importantes para o estudo de paleoambientes. De acordo com Klaja & Durek (2016) esses elementos químicos são indicadores de radioatividade natural

dos sedimentos e das rochas e são transportados em processos geológicos e normalmente acumulam-se em sedimentos argilosos. A Tabela 2 abaixo mostra os elementos os quais são obtidos a partir do gamaespectrômetro portátil e quais são as características geológicas e geoquímicas de cada elemento.

Tabela 2: Características do Th, U e K. Fonte: Modificado de Klaja & Durek (2016)

Elementos	Características
Tório	<ul style="list-style-type: none"> • Insolúvel em água; • Normalmente associado à Lamitos, podendo fornecer informações sobre o conteúdo de argila; • Combinado com metais pesados em rochas ígneas.
Urânio	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente não está ligado à presença de argilas na rocha; • Depende do conteúdo de matéria orgânica.
Potássio	<ul style="list-style-type: none"> • Componente básico de Lamitos; • Indicador de feldspatos e micas; • Ocorre comumente na forma oxidada (K₂O); • Estabiliza minerais de argila como KCl.

A partir dessas informações geradas pelo gamaespectrômetro, algumas razões geoquímicas (Tabela 3) serão integradas nesse trabalho com o objetivo de auxiliar na interpretação paleoambiental da Formação Codó. As razões a serem utilizadas serão:

Tabela 3: Significado das razões Th/U e U/K. Fonte: Modificado de Klaja & Durek (2016)

Razão	Significado
Th/U	<ul style="list-style-type: none"> • Estimativa de teor de Matéria Orgânica em Argilas; • Detecção de descontinuidades básicas; • Determina conjuntura transgressivas-regressivas e de condições REDOX.
U/K	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação de Teor de Matéria Orgânica em sedimentos argilosos; • Usado em correlações estratigráficas; • Detecção de mudanças diagenéticas na argila e em sedimentos carbonáticos.

4 METODOLOGIA

4.1 Preparo das Amostras de Calha

Para minimizar o problema da contaminação das amostras, é necessário realizar uma preparação antes de qualquer análise. Inicialmente, as amostras estão dispostas dentro de caixas (Figura 16) separadas por intervalos de profundidade, as quais foram doadas para o Instituto de Geociências pela companhia de petróleo Parnaíba Gás Natural (PGN), atual ENEVA.



Figura 16: Caixas de amostras de calha disponibilizadas pela PGN, atual Eneva. Fonte: Ribeiro (2019)

Para esse trabalho serão utilizados 6 poços: 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 4-OGX-49-MA, 4-PGN-14-MA e 7-GVB-12D-MA (Figura 17). O principal o objetivo é descrever a Formação Codó, em razão de sua importância em estudos sobre a abertura do Oceano Atlântico, logo, por ser uma formação relativamente mais rasa, para isso foi selecionado o primeiro intervalo de caixa onde em sua maioria continham amostras de 9 m até 400 m.

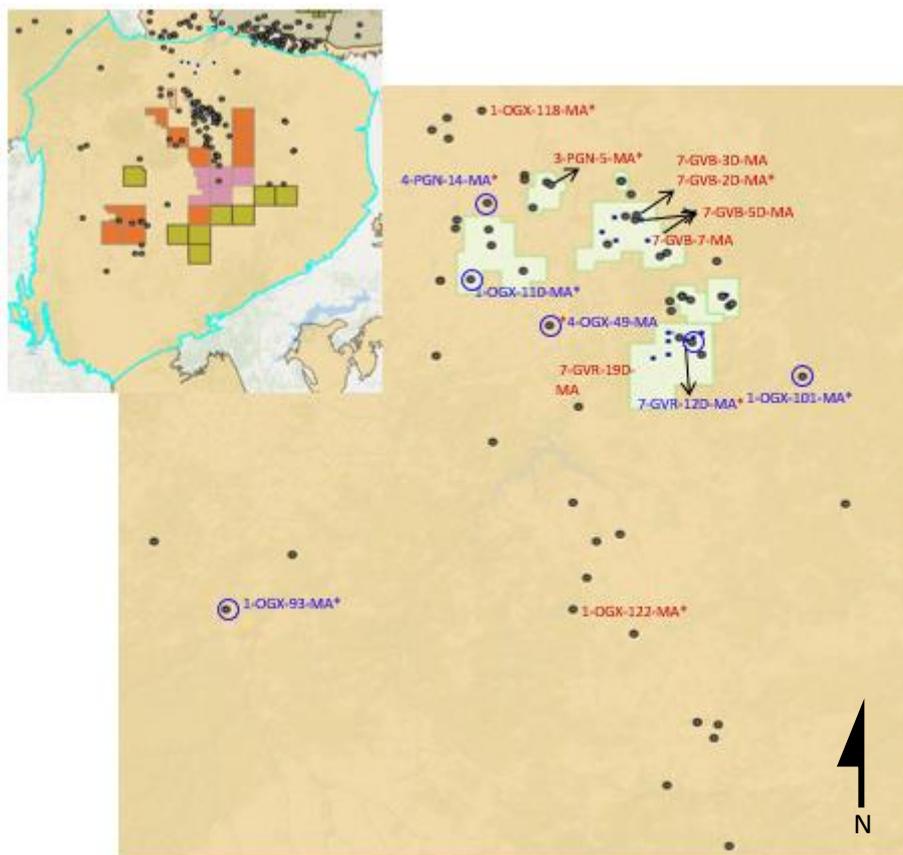


Figura 17: Mapa de localização dos poços na área do Parque dos Gaviões com os poços utilizados em destaque (azul). Fonte: Modificado de Relatório do Projeto Parnaíba (2020).

Para a lavagem é depositado cerca de 2 colheres de sopa rasas de amostras sobre uma peneira de $0,065 \mu\text{m}$. Como as amostras serviram também para análises mais sensíveis como o EDXRF, as amostras foram lavadas com água destilada e DETERTEC diluído a 5%.

Após a lavagem, a maior parte do sedimento é posto em um filtro de papel sustentado por um béquer (Figura 18) e, por ser um papel poroso todo o sedimento fica retido no mesmo enquanto a água que restou escorre para a superfície abaixo.



Figura 18: Amostras secando em filtros de papel. Fonte: Relatório do Projeto Parnaíba (2020).

4.2 Descrições

No momento em que as amostras são postas para a primeira secagem, é reservada uma pequena quantidade, relativa à meia colher de chá, para a descrição. Nessa etapa o sedimento é depositado sobre uma calha de metal a qual é disposta em uma Lupa Binocular (Figura 19) para a descrição das amostras coletadas.

Vale ressaltar que durante a perfuração dos poços, foi escolhido pelos operadores recolher as amostras a cada 9 metros, ou seja, o que está sendo analisado é um pacote de 9 metros de rocha para cada calha.



Figura 19: Lupa Binocular e Calhas. Fonte: Modificado de Calonio (2020)

O *software SedLog* foi utilizado para a organização das descrições, porcentagens e a plotagem dos dados (Figura 20). Terminada a descrição, retornamos a amostra que estava na calha para o filtro.

SCALE (m)	LITHOLOGY	DESCRIPTION	OBSERVATIONS
18		ARN, HA, MFN/FN/MD, SAR/ARD, B, CBN, DSG/SFR TB FRV, DRO	FRAG DE BROCA
27		SLT, CTN, AVM, MLE - ARN, HA, MLE - ARN, HA, MFN/FNO, SAR, B, DSG, DRO	
36		ARN, ARD, B, HA, DRO, DSG, FNO - SLT, VRM, ACZ, MLE	
45		FLH, CTN, AVM, MAC, MLE - SLT, CRM, ESB, MLE - ARN, HA, MFN, ARD, B, DSG	
64		ARN, ARD, B, HA, DRO, DSG, FNO - SLT, CNZ, MLE - FLH, VRD, ACZ, MLE, LAM	

Figura 20: Imagem do *software SedLog* com as descrições das amostras de calha. Fonte: Elaboração Própria.

4.3 Armazenamento e Seleção

É aguardado um dia para que toda a água escorra do sedimento deixando a amostra quase seca, porém, como existe a possibilidade de ainda haver umidade presente dentro da mesma, colocam-se as amostras por mais 24h dentro de uma estufa a 40° C.

As amostras são retiradas da estufa e maceradas em um almofariz de ágata (Figura 21) com o objetivo de armazená-las para futuras análises de EDXRF. Após esse processo, as rochas são armazenadas em pequenos sacos *ziploc* onde, em caneta permanente, são escritas sobre o plástico o nome do poço, sua respectiva profundidade e principais litologias. A análise química a ser realizada é no EDXRF e, por não ser uma análise destrutiva, elas retornam sem ter o seu conteúdo químico alterado.



Figura 21: Almofariz de ágata. Fonte: <https://www.metaquimica.com/almofariz-com-pistilo-de-agata-gral-com-pistilo-almofariz-com-pistilo-de-agata.html>

Na figura 22 podemos ver o fluxo de trabalho realizado no laboratório com as amostras estudadas.



Figura 22: Fluxo de trabalho. Fonte: Elaboração Própria.

4.4 Gamaespectrometria

Para o levantamento de Gamaespectrometria, foi utilizado o gamaespectrômetro portátil Radiation Solutions Inc RS-230 BGO Super-SPEC Handheld Gamma-Ray Spectrometer (Figura 23) que fornece o valor de raios gamas totais, além dos valores de K em % e os valores de U e Th em ppm. Foram analisadas todas as 77 amostras dos seis poços, nas profundidades correspondentes à Formação Codó com a finalidade de criar um perfil litológico de GR total e dos gamas individualizados.

Esse processo foi realizado com um tempo de leitura de 60s para cada amostra no modo assay, as quais estavam armazenadas em sacos de pano de aproximadamente 500 g. Assim, o equipamento foi posicionado sobre cada amostra alocada no centro de uma malha de chumbo e os valores Total GR (nGy/h), K (%), U

(ppm) e Th (ppm) foram anotados em uma planilha Excel, onde posteriormente os dados foram exportados para o *software* Trace.



Figura 23: Foto do gamaespectrômetro utilizado nas amostras de calha para a geração das curvas individualizadas de tório, urânio e potássio. Fonte: Nobre (2019).

4.5 Análises de Fluorescência de Raios-X (EDXRF)

Nesse trabalho é utilizado o EDXRF EPSILON 1 (Figura 24) e após todo o processo da descrição e secagem, a amostra de calha é colocada em um tubo de PVC com um plástico filme por baixo e é inserido dentro do EDXRF. O aparelho foi calibrado para uma análise de 10 minutos e a cada 10 amostragens.

Foram analisadas todas as amostras de calha referente à Formação Codó dos seis poços estudados.



Figura 24: Foto do equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (EDXRF). Fonte: Workshop do Projeto Parnaíba (outubro/2019).

4.6 Análises Estatísticas dos Dados

A estatística é uma ferramenta fundamental para a análise de diversos dados. Desde a introdução dos computadores, técnicas matemáticas mais refinadas passaram a ser utilizadas mais comumente e em maior escala em pesquisas científicas.

De acordo com Vicini (2005), os métodos estatísticos, para análise de variáveis, estão dispostos em dois grupos:

- Estatística univariada: que trata da estatística olhando as variáveis de maneira isolada.
- Estatística multivariada: que trata da estatística olhando as variáveis de maneira conjunta.

Nesse estudo, serão utilizados dois tipos de análises estatísticas multivariadas.

4.6.1 Análises de Agrupamentos – AA

De acordo com Vicini (2005), a Análise de Agrupamentos é uma técnica onde sua finalidade é encontrar e separar objetos em grupos similares. Um exemplo prático de como essa técnica funciona seria em uma prateleira de supermercados e for utilizado a técnica de AA nas prateleiras, os produtos serão organizados e agrupados de acordo com suas características, compostos ou do mesmo princípio ativo.

Após o momento onde o algoritmo é aplicado e os grupos são determinados, inicia-se o processo de verificação dos agrupamentos, identificando quais seriam as homogeneidades dentro dos grupos e as heterogeneidades entre os grupos.

Dendograma ou Fenograma, também chamado de gráfico em árvore, este tipo de representação estampa a forma gráfica de uma análise de agrupamentos, sintetizando a informação. Há duas formas de representar um dendograma, horizontalmente ou verticalmente, nesse trabalho os dendogramas serão apresentados de maneira horizontal como na Figura 25 abaixo.

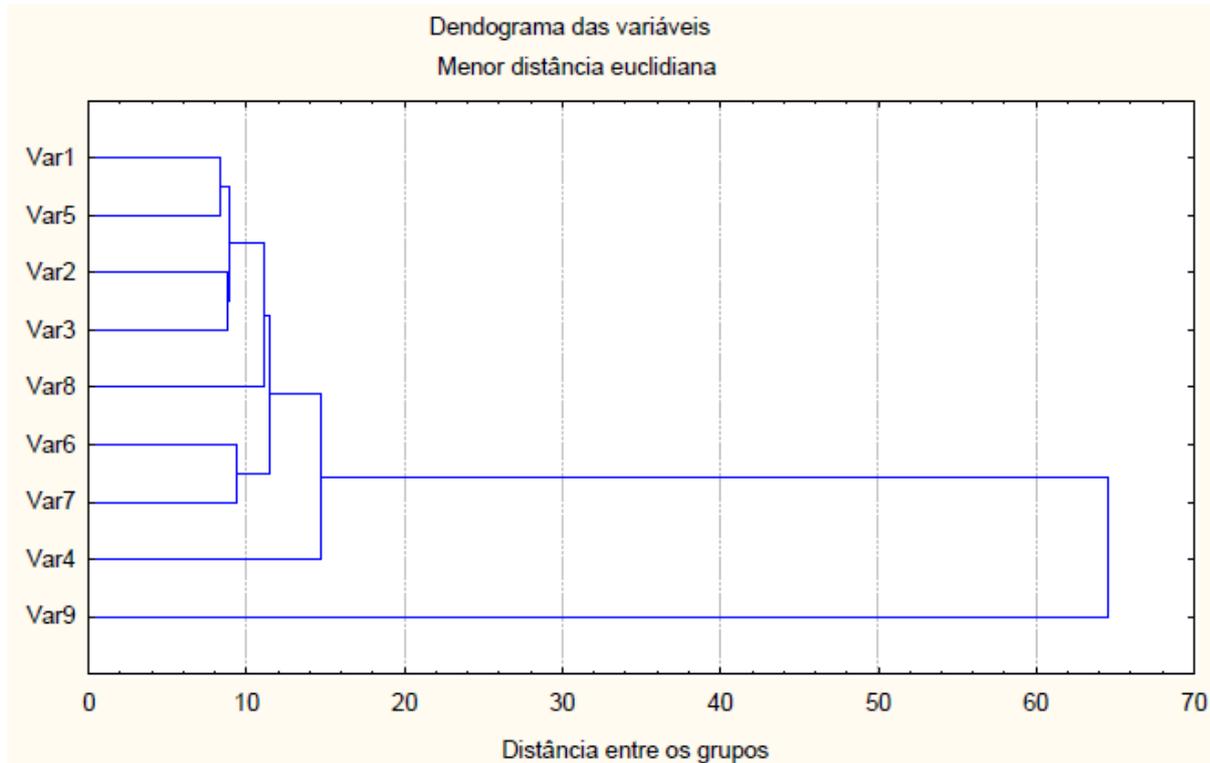


Figura 25: Representação gráfica de uma Análise de Agrupamento em Dendograma. Fonte: Vicini (2005).

Para a aplicação do algoritmo do Dendograma, foi utilizado o *software* Orange (Figura 26), que recebe os dados em uma tabela e ao final plota o gráfico com suas respectivas componentes principais.

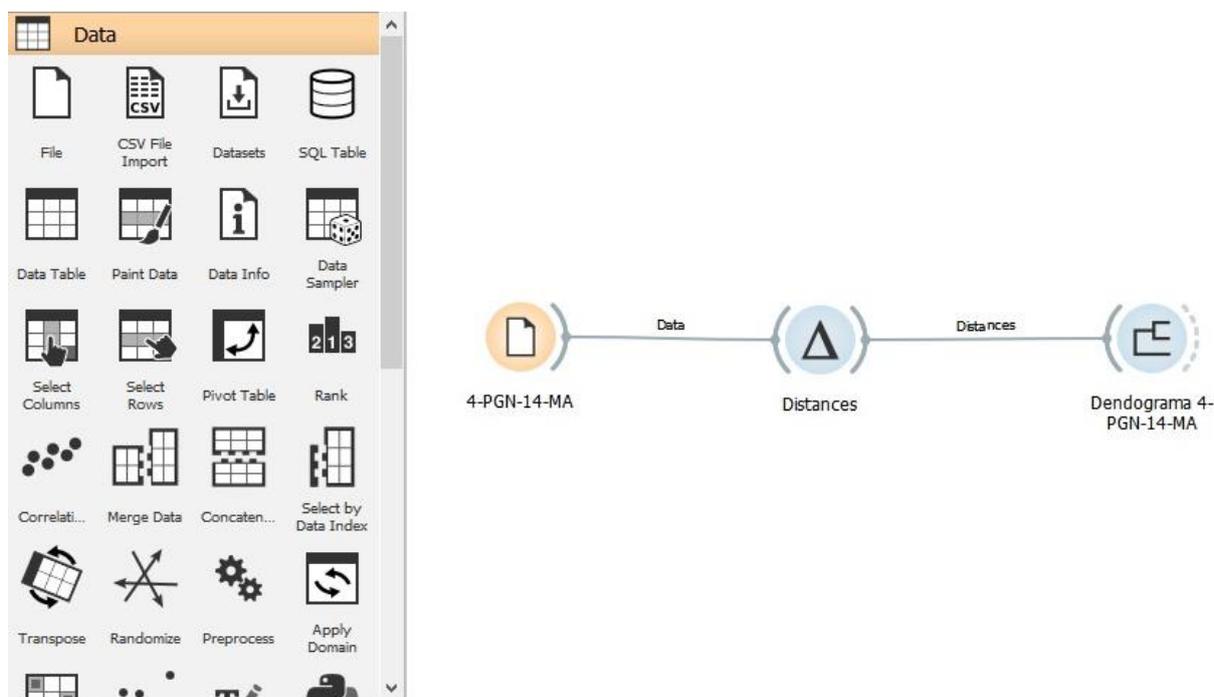


Figura 26: Tela inicial Orange. Fonte: Elaboração Própria.

5. RESULTADOS

5.1 Análise Qualitativa dos Dados Gerados pelo EDXRF

O EDXRF após o levantamento dos dados, produziu em excel, as tabalas abaixo referentes aos poços estudados. As tabelas 4, 5, 6, 7, 8 e 9 estão todos os elementos analisados pelo EDXRF que foram utilizados neste trabalho.

Tabela 4: Valores de Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb e Sr para 12 amostras do poço 1-OGX-93-MA, coletadas de 9 em 9 metros entre as profundidades de 18 m a 135 m.

Profundidades	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cl (%)	K (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Rb (%)	Sr (%)
1-OGX-93-MA-18	2.54	12.368	44.112	0.7411	0	1.42	2.434	6.721	1.939	0.05291	0.0304	0.11313	26.396	0.2141	0.01537	0.015	0.07444
1-OGX-93-MA-27	2.906	11.84	50.061	0.87324	0	1.31	2.555	8.021	1.944	0.04799	0.02264	0.07618	19.532	0.19494	0.01022	0.0148	0.0832
1-OGX-93-MA-36	2.327	9.306	50.091	0.79108	0	0.62851	3.014	9.173	1.609	0.04729	0.06449	0.15227	21.94	0.22377	0.01863	0.01612	0.07959
1-OGX-93-MA-45	1.321	10.818	31.27	0.54896	0	0.87389	5.777	2.296	1.57	0.0539	0.02336	0.8531	41.338	0.40326	0.1126	0.07153	0.06446
1-OGX-93-MA-54	1.742	10.328	28.117	0.4927	0	0.80599	6.149	1.914	1.351	0.0437	0.03161	1.241	43.278	0.44984	0.11232	0.05925	0.06221
1-OGX-93-MA-63	2.016	11.337	30.764	0.60874	0	1.916	8.11	3.434	1.946	0.05635	0.03799	0.61232	36.614	0.36106	0.07836	0.1131	0.08432
1-OGX-93-MA-72	1.758	12.275	29.538	0.54903	1.593	0.94729	7.932	6.907	1.807	0.07307	0.0427	0.40194	34.377	0.34003	0.05168	0.09102	0.05906
1-OGX-93-MA-81	2.1	10.22	24.231	0.53055	0.71525	0.61932	6.256	19.121	1.677	0.05074	0.03506	0.97377	31.913	0.2794	0.04906	0.06382	0.05264
1-OGX-93-MA-90	2.056	6.681	18.853	0.42059	1.345	0.48642	4.948	45.212	1.376	0.03699	0.02015	0.88564	16.955	0.10546	0.02377	0.03989	0.05359
1-OGX-93-MA-99	1.925	7.164	21.19	0.43254	5.17	0.58665	5.37	38.193	1.292	0.05127	0.02893	0.53374	17.335	0.12694	0.02566	0.04647	0.08139
1-OGX-93-MA-108	5.406	3.963	20.087	0.50266	2.258	0.40985	2.623	48.914	0.98047	0.0576	0.0083	0.7586	12.791	0.10251	0.02123	0.02377	0.21958
1-OGX-93-MA-117	2.495	10.087	36.302	0.61806	0.64789	0.77325	10.332	14.122	1.807	0.05769	0.0351	0.22795	21.583	0.20712	0.03837	0.0796	0.09036
1-OGX-93-MA-126	3.635	5.353	52.034	0.92525	0.93239	1.168	6.133	22.656	0.76898	0.01945	0.02766	0.23385	5.688	0.03436	0.00615	0.01846	0.03831
1-OGX-93-MA-135	4.205	6.163	64.662	1.113	0.51088	2.131	4.876	9.928	0.69674	0.00399	0.0413	0.08235	5.167	0.09744	0.00679	0.00999	0.01874
Média	2.602286	9.135929	35.808	0.653393	0.940886	1.005441	5.464929	16.90086	1.483156	0.046639	0.032121	0.510417	23.92193	0.224302	0.040729	0.047344	0.075849
Desvio Padrão	1.113801	2.754564	14.13948	0.20602	1.409912	0.525656	2.333198	16.01791	0.42533	0.017159	0.013028	0.382818	12.23824	0.127066	0.036381	0.033041	0.045863

Tabela 5: Valores de Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb e Sr do Poço 4-OGX-49-MA, localizado a W do campo gavião real, coletadas de 9 em 9 metros entre as profundidades de 18 m a 117 m.

Profundidades	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cl (%)	K (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Rb (%)	Sr (%)
4-OGX-49-MA 18	1.916	7.804	44.423	0.88528	0	0.99356	8.571	2.294	1.882	0.03071	0.00196	1.447	23.103	0.27378	0.09064	0.07201	0.08563
4-OGX-49-MA 27	1.296	9.116	37.392	0.70584	0	1.017	7.95	9.067	2.256	0.03954	0.0255	1.332	26.389	0.26494	0.03306	0.08053	0.09884
4-OGX-49-MA 36	1.704	9.953	35.37	0.67935	0.62125	0.703	7.905	8.283	2.664	0.05597	0.02944	0.63322	29.447	0.29907	0.04375	0.10155	0.10494
4-OGX-49-MA 45	1.806	12.874	35.358	0.58971	0.11187	0.83054	8.362	4.57	2.354	0.06352	0.04332	0.39578	30.939	0.30308	0.05024	0.11223	0.10477
4-OGX-49-MA 54	1.495	13.202	34.603	0.5514	0.99951	0.72997	8.548	3.417	2.175	0.06596	0.04893	0.31512	32.097	0.3179	0.05058	0.1208	0.10837
4-OGX-49-MA 63	2.183	13.443	33.353	0.57059	1.606	0.71294	8.878	3.269	2.05	0.06619	0.05211	0.18802	32.115	0.32259	0.05327	0.13506	0.12738
4-OGX-49-MA 72	1.533	10.569	32.861	0.63638	3.059	0.84626	9.038	9.634	2.239	0.06725	0.04185	0.30694	27.121	0.275	0.04741	0.10981	0.12755
4-OGX-49-MA 81	2.573	6.969	47.315	0.76318	0.76692	0.94746	7.845	21.944	1.209	0.01466	0.00275	0.36927	8.564	0.05553	0.01731	0.06147	0.0813
4-OGX-49-MA 90	3.343	5.82	28.509	0.58741	1.33	0.43927	5.583	33.909	1.422	0.05554	0.03435	0.6057	16.567	0.14306	0.02418	0.04948	0.16505
4-OGX-49-MA 99	3.512	4.489	16.949	0.47194	4.551	0.52642	3.689	47.577	1.096	0.06224	0.02639	1.274	14.691	0.13039	0.0271	0.03776	0.13025
4-OGX-49-MA 108	2.412	4.57	64.046	1.262	0.593	1.423	4.735	15.794	0.54895	0.00892	0	0.18541	4.024	0.07887	0	0.00881	0.02591
4-OGX-49-MA 117	2.269	3.136	76.962	1.301	0	1.778	4.887	7.336	0.3731	0.00181	0	0.06208	1.582	0.03213	0	0.00513	0.00953
Média	2.170167	8.495417	40.59508	0.75034	1.136546	0.912285	7.165917	13.9245	1.689088	0.044359	0.02555	0.592878	20.55325	0.208028	0.036462	0.074553	0.09746
Desvio Padrão	0.703709	3.602542	16.09821	0.270546	1.390019	0.372895	1.88464	14.02478	0.744998	0.024442	0.019791	0.486265	11.13843	0.111066	0.025326	0.0432	0.043617

Tabela 6: Valores de Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb e Sr do Poço 1-OGX-110-MA, localizado no campo Gavião Preto, coletadas de 9 em 9 metros entre as profundidades de 63 m a 189 m.

Profundidades	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cl (%)	K (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Rb (%)	Sr (%)
1-OGX-110-MA 63	2.042	6.337	32.635	0.62366	0.5228	1.712	6.256	25.436	1.72	0.0775	0	0.27971	18.414	0.14415	0.02651	0.05735	0.21693
1-OGX-110-MA 72	2.082	9.004	37.031	0.64411	0	2.044	9.075	10.479	2.4	0.04356	0.01145	0.24542	24.772	0.24398	0.03211	0.09905	0.12254
1-OGX-110-MA 81	1.355	8.482	39.129	0.66167	0.23794	2.409	8.377	12.348	2.232	0.05519	0.0101	0.25985	21.812	0.19249	0.0295	0.0801	0.13776
1-OGX-110-MA 90	2.123	9.054	40.228	0.74559	0	1.892	9.204	7.386	2.141	0.04587	0.02171	0.19749	24.347	0.25337	0.03899	0.10244	0.13359
1-OGX-110-MA 99	1.251	9.683	44.434	0.84898	0	1.669	10.015	9.139	2.661	0.04686	0.02095	0.46357	18.199	0.18398	0.03191	0.09726	0.10573
1-OGX-110-MA 108	1.337	9.612	42.459	0.73512	0	1.593	9.992	5.125	2.899	0.05659	0.02614	0.27558	24.211	0.25411	0.03482	0.10992	0.1037
1-OGX-110-MA 117	1.116	9.998	42.222	0.75982	0	1.982	9.107	5.408	2.792	0.05012	0.02599	0.29283	24.416	0.25827	0.03689	0.10252	0.10481
1-OGX-110-MA 126	1.056	9.506	38.84	0.69321	0.2186	1.52	7.89	10.098	2.311	0.04913	0.01332	0.36914	24.75	0.24484	0.03535	0.09045	0.12586
1-OGX-110-MA 135	2.06	11.872	35.53	0.65119	0.40645	1.141	8.025	5.14	2.029	0.05455	0.03486	0.22875	31.399	0.32309	0.04184	0.11587	0.10194
1-OGX-110-MA 144	2.502	11.767	37.116	0.66676	0.26663	1.199	8.636	4.168	2.134	0.05297	0.03177	0.18414	29.798	0.3015	0.04498	0.12057	0.09636
1-OGX-110-MA 153	1.505	9.82	40.479	0.77994	0.06984	1.285	8.82	6.655	2.172	0.04863	0.0325	0.23784	26.5	0.2715	0.04298	0.11609	0.11824
1-OGX-110-MA 162	2.12	8.881	48.232	0.89604	0	1.465	9.618	7.837	2.037	0.03762	0.01743	0.28447	17.317	0.18389	0.03147	0.09144	0.10148
1-OGX-110-MA 171	2.355	7.222	34.052	0.67866	6.142	1.265	6.315	24.838	1.466	0.04348	0.01164	0.2987	14.219	0.14432	0.03564	0.05897	0.24521
1-OGX-110-MA 180	1.768	5.795	25.939	0.52575	11.515	0.84837	4.521	35.154	1.263	0.03413	0.01421	0.25349	11.458	0.10547	0.01791	0.04098	0.26331
1-OGX-110-MA 189	2.405	3.622	15.007	0.47128	17.508	0.87218	2.774	49.179	0.78805	0.01813	0	0.15217	6.256	0.06246	0.01224	0.02475	0.32806
Média	1.805133	8.710333	36.88887	0.692119	2.459151	1.526437	7.908333	14.55933	2.06967	0.047622	0.018138	0.26821	21.1912	0.211161	0.032876	0.087184	0.153701
Desvio Padrão	0.492958	2.189989	8.03877	0.110214	5.255997	0.440877	2.085287	13.21801	0.57042	0.012833	0.010911	0.075194	6.865505	0.073901	0.008885	0.02903	0.072867

Tabela 7: Valores de Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb e Sr do Poço 1-OGX-101-MA, localizado a E do campo Gavião Real, coletadas de 9 em 9 metros entre as profundidades de 18 m a 153 m.

Profundidades	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cl (%)	K (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Rb (%)	Sr (%)
1-OGX-101-MA 18	1.375	7.194	25.153	0.52892	0	0.83566	3.172	1.889	1.07	0.02156	0.01694	0.78842	56.098	0.57639	0.07637	0.03757	0.03078
1-OGX-101-MA 27	2.241	12.228	32.906	0.57902	0	1.426	8.153	3.99	2.372	0.06629	0.04669	0.4509	33.83	0.35393	0.05819	0.11978	0.09801
1-OGX-101-MA 36	1.659	11.724	32.797	0.62277	0.13161	1.822	7.947	6.229	2.702	0.0717	0.04377	0.55286	32.322	0.32441	0.05443	0.12754	0.11921
1-OGX-101-MA 45	2.646	13.25	33.721	0.61426	0.23171	1.96	8.458	2.069	2.336	0.07056	0.04622	0.30005	32.971	0.33168	0.05631	0.13249	0.08362
1-OGX-101-MA 54	2.104	12.907	33.935	0.55935	0.11421	1.56	8.642	2.224	2.228	0.06648	0.05066	0.27491	34.123	0.33838	0.05752	0.1382	0.07287
1-OGX-101-MA 63	2.768	12.284	33.27	0.68354	0.94794	1.897	8.951	3.568	2.037	0.07175	0.04339	0.24556	31.842	0.33473	0.06106	0.13156	0.09684
1-OGX-101-MA 72	2.132	8.414	47.697	0.87444	1.234	1.151	8.597	14.009	1.581	0.03421	0.02001	0.23868	13.138	0.14335	0.02352	0.06523	0.06472
1-OGX-101-MA 81	2.319	9.14	23.457	0.70279	2.921	0.7784	6.363	29.86	1.548	0.07431	0.04183	0.38385	21.601	0.17754	0.03872	0.07726	0.16493
1-OGX-101-MA 90	2.135	4.089	9.492	0.47709	17.986	0.656	2.597	52.601	0.77647	0.03203	0.01737	0.17175	8.452	0.05219	0.01391	0.0216	0.25719
1-OGX-101-MA 99	3.612	3.094	11.023	0.39658	14.539	0.69202	1.72	56.673	0.67665	0.03369	0.00613	0.27523	6.389	0.04843	0.01075	0.01114	0.36276
1-OGX-101-MA 108	6.835	3.377	22.032	0.57854	3.512	1.649	2.173	44.203	0.96746	0.06124	0.01655	0.5394	13.086	0.09673	0.02048	0.01876	0.2659
1-OGX-101-MA 117	2.085	10.953	33.533	0.65787	1.01	1.682	12.234	5.293	2.461	0.08212	0.04361	0.15248	28.377	0.29705	0.05371	0.13396	0.09906
1-OGX-101-MA 126	1.385	10.653	34.344	0.65251	0.55484	1.527	12.367	4.025	2.239	0.07458	0.0403	0.13804	30.318	0.31782	0.04738	0.12351	0.08612
1-OGX-101-MA 135	1.955	10.701	32.631	0.64451	0.65181	1.278	12.739	3.71	2.297	0.0835	0.04479	0.14242	31.475	0.31961	0.05184	0.13585	0.09182
1-OGX-101-MA 144	2.897	10.811	35.064	0.69069	0.17068	1.158	11.228	8.01	2.455	0.06988	0.04818	0.25239	25.741	0.26683	0.0409	0.11014	0.09723
1-OGX-101-MA 153	1.41	8.075	63.913	1.178	0.55134	2.216	6.862	5.153	1.203	0.02299	0.04069	0.08244	8.747	0.09055	0.01336	0.02175	0.02669
Média	2.472375	9.305875	31.5605	0.652555	2.784759	1.393005	7.637688	15.21913	1.809349	0.058556	0.035446	0.311836	25.53188	0.254351	0.042403	0.087896	0.1261094
Desvio Padrão	1.30808	3.349347	12.79328	0.175856	5.392948	0.481856	3.647404	19.22405	0.681916	0.021571	0.014464	0.188716	13.03444	0.141767	0.020116	0.050199	0.0922493

Tabela 8: Valores de U, Mg, Al, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb, Sr e Th do Poço 7-GVB-12D-MA, localizado a no campo Gavião Branco, coletadas de 9 em 9 metros entre as profundidades de 126 m a 198 m.

Profundidades	U (%)	Mg (%)	Al (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Rb (%)	Sr (%)	Th (%)
7-GVB-12-MA 126	0.04231	0.85569	4.823	35.637	0.84802	0.0335	0.02886	0.23666	8.457	0.11271	0.01146	0.03966	3.801	0
7-GVB-12-MA 135	0.0326	0.94423	2.895	49.547	0.49327	0.00765	0.00905	0.13708	4.56	0.05741	0.01103	0.02102	2.808	0
7-GVB-12-MA 144	0.01453	2.224	1.881	62.25	0.39927	0.0205	0.00105	0.27198	3.808	0.02183	0.0096	0.01123	1.359	0
7-GVB-12-MA 153	0.00633	1.927	6.341	22.786	1.483	0.02241	0	0.21464	8.135	0.05749	0.01346	0.04195	0.65933	0.00087
7-GVB-12-MA 162	0.0026	2.456	8.265	10.52	1.644	0.0267	0.01916	0.14654	9.335	0.09564	0.01563	0.05207	0.1096	0.00588
7-GVB-12-MA 171	0.00363	2.213	5.702	41.842	1.29	0.04567	0.02288	0.874	13.621	0.10277	0.02763	0.04283	0.28389	0.00323
7-GVB-12-MA 180	0.00456	1.439	6.38	34.866	1.637	0.04837	0.01477	0.77674	17.544	0.15122	0.0202	0.059	0.23084	0.00572
7-GVB-12-MA 189	0.00693	1.11	6.673	30.511	1.58	0.04585	0.02044	0.50885	17.408	0.1513	0.02708	0.06079	0.21286	0.00676
7-GVB-12-MA 198	0.0044	1.562	8.804	13.767	2.023	0.04653	0.03285	0.28731	22.073	0.16232	0.0094	0.08593	0.14638	0.01206
Média	0.013099	1.636769	5.751556	33.52511	1.266396	0.03302	0.016562	0.383756	11.66011	0.10141	0.016166	0.046053	1.067878	0.003836
Desvio Padrão	0.014439	0.596253	2.270244	16.58795	0.561568	0.01456	0.011472	0.273765	6.325459	0.048786	0.007175	0.022132	1.349232	0.004142

Tabela 9: Valores de Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb e Sr do Poço 4-PGN-14-MA, localizado a N do campo Gavião Preto, coletadas de 9 em 9 metros entre as profundidades de 126 m a 243 m.

Profundidades	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cl (%)	K (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Ni (%)	Rb (%)	Sr (%)
4-PGN-14-MA 126	1.301	10.488	42.133	0.73387	0.61436	0.87622	8.953	5.187	2.633	0.06201	0.03436	0.25327	25.085	0.24498	0.02942	0.0997	0.10407
4-PGN-14-MA 135	1.622	13.037	33.682	0.62713	0.56665	0.85731	7.071	5.632	2.133	0.07038	0.04724	0.18608	33.159	0.30535	0.0356	0.11527	0.12556
4-PGN-14-MA 144	1.681	12.445	32.965	0.60986	0.52789	0.78559	6.91	4.921	2.052	0.05954	0.04388	0.15828	33.303	0.31315	0.03673	0.11749	0.1348
4-PGN-14-MA 153	1.291	10.803	33.608	0.67498	0.73656	0.82487	6.718	10.942	2.124	0.06135	0.03898	0.29731	29.631	0.28266	0.02768	0.10699	0.12437
4-PGN-14-MA 162	1.157	6.234	40.781	0.74082	0.71333	0.97113	4.033	29.801	1.302	0.04294	0.00658	0.40299	12.804	0.14951	0.02213	0.04396	0.0663
4-PGN-14-MA 171	1.728	4.237	11.731	0	16.978	0.66274	2.149	49.661	0.98158	0.03741	0.01986	0.22439	10.689	0.07861	0	0.02796	0.42018
4-PGN-14-MA 180	1.478	10.286	38.505	0.80147	2.899	0.98964	7.022	11.034	1.903	0.05142	0.02748	0.14431	23.489	0.23054	0.03136	0.09223	0.12561
4-PGN-14-MA 189	1.635	9.331	40.958	0.78701	1.261	1.023	6.478	14.174	1.746	0.04724	0.02552	0.1977	21.162	0.18663	0.02612	0.08679	0.11336
4-PGN-14-MA 198	1.442	7.553	35.657	0.65433	1.444	0.56712	5.546	24.312	1.74	0.04973	0.03273	0.32889	19.598	0.18004	0.02166	0.07084	0.12097
4-PGN-14-MA 207	2.137	7.214	30.011	0.63092	1.102	0.69258	4.941	28.68	1.771	0.05652	0.02993	0.44547	21.075	0.17049	0.02568	0.07199	0.13065
4-PGN-14-MA 216	1.774	7.652	24.674	0.63993	1.345	0.65448	4.848	33.912	1.592	0.07191	0.02925	0.78949	20.933	0.17453	0.0245	0.06773	0.2017
4-PGN-14-MA 225	1.841	6.322	21.517	0.50515	0.76158	0.61194	4.16	37.999	1.543	0.06992	0.03292	1.218	22.529	0.17131	0.0351	0.06276	0.18986
4-PGN-14-MA 234	1.487	6.861	63.243	1.064	0.0368	1.257	8.445	4.507	1.349	0.0212	0.00673	0.10473	10.666	0.08742	0.01051	0.05644	0.06942
4-PGN-14-MA 243	1.672	7.081	59.687	0.8965	0.72929	0.96638	7.287	5.37	1.314	0.04256	0.02323	0.11194	13.966	0.14449	0.01634	0.06498	0.07477
Média	1.589	8.538857	36.368	0.668998	2.122533	0.838571	6.040071	19.00943	1.727399	0.053152	0.028478	0.347346	21.29207	0.194265	0.024488	0.077509	0.142973
Desvio Padrão	0.253986	2.561306	13.51921	0.237102	4.32724	0.192505	1.857114	14.87701	0.428248	0.014311	0.011893	0.307936	7.490953	0.072954	0.010178	0.026687	0.088785

5.2 Análise Estatística (Dendograma)

Em seguida aos levantamentos laboratoriais, iniciou-se a fase de tratamentos dos dados obtidos pelo EDXRF. Em um primeiro momento houve uma necessidade de trabalhar estatisticamente com os dados, logo foi decidido o uso de um algoritmo de *clustering*, no *software* Orange, a fim de avaliar a familiaridade dos elementos químicos com o propósito de facilitar a interpretação e o agrupamento dos dados, além de realizar um trabalho de controle de qualidade (Figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32).

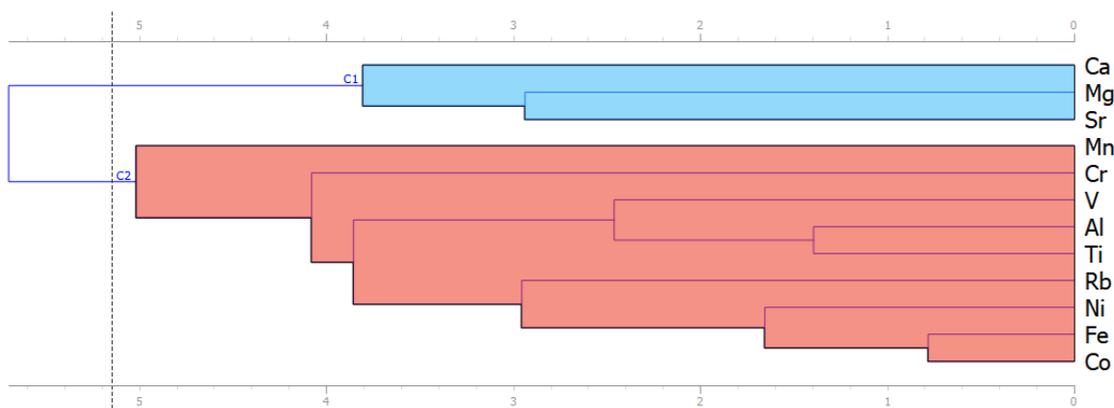


Figura 27: Dendrograma do Poço 1-OGX-93-MA onde foram identificados 2 grupos, onde o grupo C1 contém Ca, Mg e Sr e o grupo C2 Mn, Cr, V, Al, Ti, Rb, Ni, Fe e Co. Fonte: Elaboração própria.

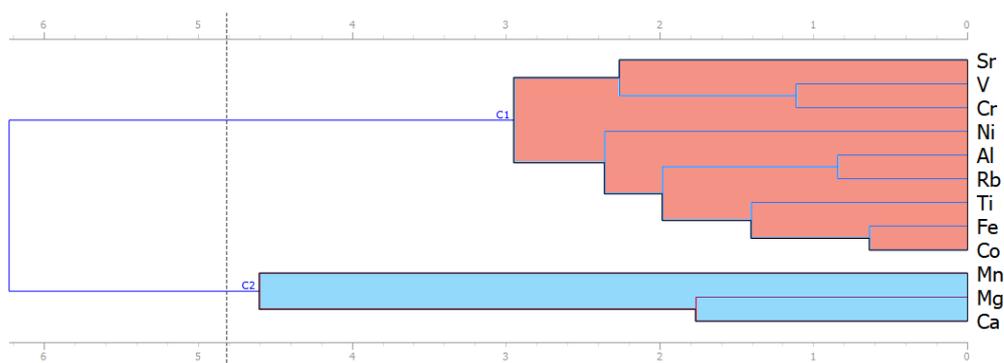


Figura 28: Dendrograma do Poço 4-OGX-49-MA onde 2 grupos foram identificados, sendo que C1 contém Sr, V, Cr, Ni, Al, Rb, Ti, Fe e Co e o grupo C2 possui Mn, Mg e Ca. Fonte: Elaboração própria.

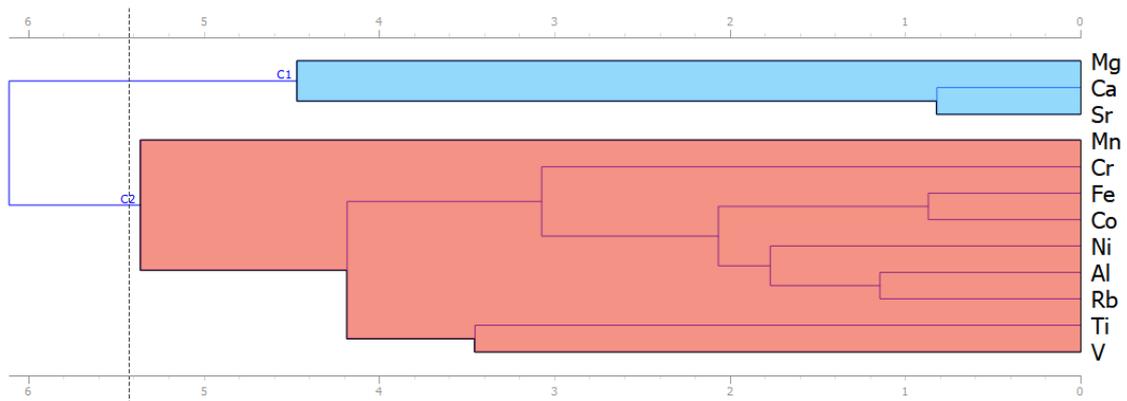


Figura 29: Dendrograma do Poço 1-OGX-110-MA onde 2 grupos foram identificados, sendo que C1 contém Mg, Ca e Sr e C2 Mn, Cr, Fe, Co, Ni, Al, Rb, Ti e V. Fonte: Elaboração própria.

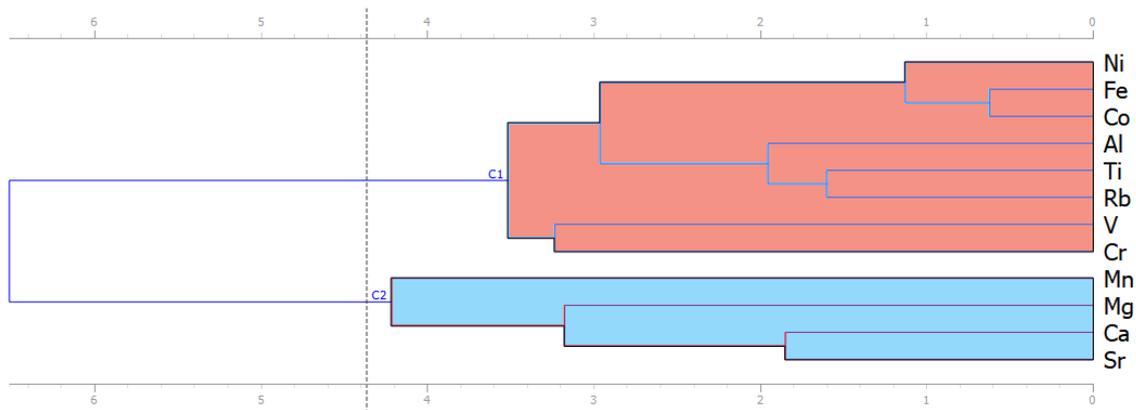


Figura 30: Dendrograma do Poço 1-OGX-101-MA onde o grupo C1 contém os elementos de Ni, Fe, Co, Al, Ti, Rb, V e Cr e o grupo C2 Mn, Mg, Ca e Sr. Fonte: Elaboração própria.

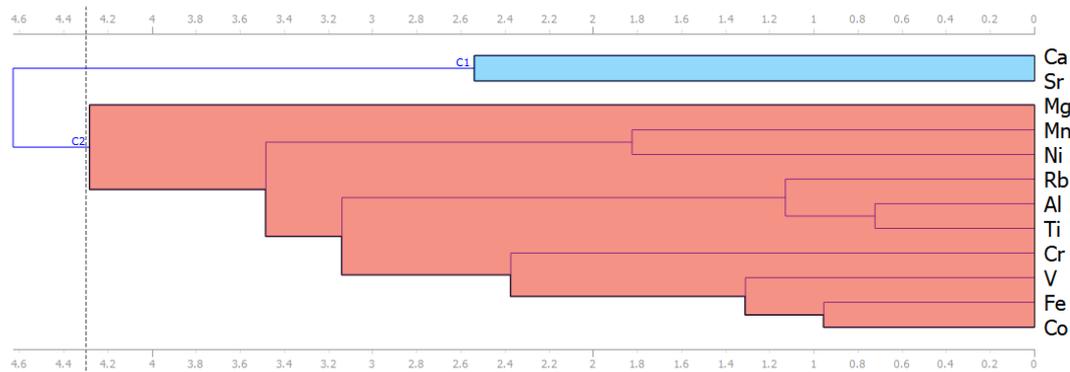


Figura 31: Dendrograma do Poço 7-GVB-12D-MA formando 2 grupos, onde o grupo C1 compreende Ca e Sr e o grupo C2 compreende Mg, Mn, Ni, Rb, Al, Ti, Cr, V, Fe e Co. Fonte: Elaboração própria.

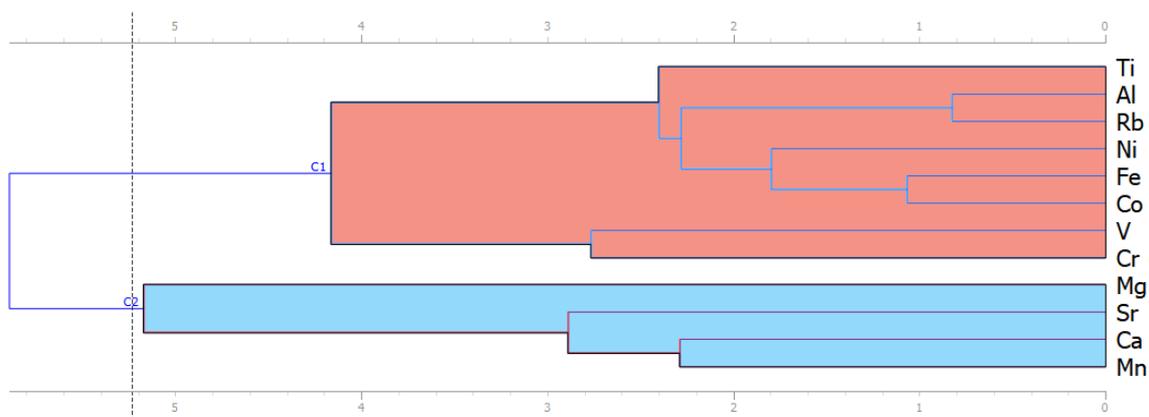


Figura 32: Dendrograma do Poço 4-PGN-14-MA formando 2 grupos, onde C1 contém Ti, Al, Rb, Ni, Fe, Co, V, Cr e C2 compreende Mg, Sr, Ca e Mn. Fonte: Elaboração própria.

5.3 Razões Geoquímicas Utilizadas e Litologias Interpretadas

As razões geoquímicas oriundas do EDXRF foram plotadas no *software* Trace juntamente com a litologia interpretada a partir das amostras de calha e a curva de GR. Vale ressaltar que o poço 4-OGX-49-MA (Figura 33) não tem a disponibilidade da curva de GR, logo sua interpretação litológica foi realizada somente com a utilização das amostras de calha. Além disso, destaca-se que o poço 7-GVB-12D-MA (Figura 32) não possui amostras de calha no intervalo sup./-55m e não teve a litologia interpretada na parte superior da Formação Codó. Desta forma, não foram obtidos valores das concentrações químicas nesse intervalo. As figuras e as discussões sobre o comportamento dessas razões serão detalhadas no próximo capítulo.

Vale ressaltar que todos os poços abaixo foram corrigidos em cota a partir da Equação 3 abaixo:

$$C = MR - P$$

Onde, (Eq. 3)

C é a Cota

MR o valor da altura da Mesa Rotativa, a qual se comporta como um Datum de referência de altitude do poço

PM que é a profundidade medida a partir da Mesa Rotativa.

6 DISCUSSÕES

A partir dos dados gerados, apresentados no capítulo anterior, serão mostrados nessa sessão as interpretações dos resultados e a discussão paleoambiental durante a passagem Aptiano-Albiano, na Área do Parque dos Gaviões. Além disso será discutida uma correlação entre os poços a partir das interpretações litológicas, geoquímicas e geofísicas. O intervalo interpretado teve como foco a Formação Codó, onde em média a profundidade varia de 18 m a 300 m.

6.1 Interpretação Litológica

Em todos os poços as litologias encontradas foram: arenitos, folhelhos e carbonatos. Em outros poços específicos, foram encontradas camadas de anidritas e/ou siltitos ao longo de sua sessão sedimentar como descritos abaixo:

❖ Poço 1-OGX-93-MA

De acordo com a interpretação de calha do poço 1-OGX-93-MA, o padrão representado pelas amostras é de rochas com uma alta presença de folhelhos e carbonatos ao longo de quase toda a sessão sedimentar, além da constante presença de arenitos mal selecionados. Nas descrições foram registradas uma grande concentração de rochas carbonáticas por volta das profundidades de 145m a 100m,

onde também se encontra a fração mais argilosa do poço. Nos intervalos mais superiores, entre 180m a 143m observam-se amostras com uma maior presença de arenitos com eventuais presenças de folhelhos.

❖ **Poço 1-OGX-101-MA**

A descrição no poço 1-OGX-101-MA apresentou uma litologia com altas concentrações de folhelhos durante toda a sessão sedimentar. Nesse poço nos primeiros metros descritos, são encontrados pequenos pacotes de siltitos e arenitos em meio a um grande pacote de folhelho. Também foi identificada uma coluna de anidrita entre 50m e 30m, e por fim, abaixo, o padrão de um grande bloco de folhelho com a presença casual de outras rochas siliciclásticas retorna, porém com uma maior aparição de carbonatos.

❖ **Poço 7-GVB-12D-MA**

Os resultados no poço 7-GVB-12D-MA apresentaram diversos pacotes com arenitos, folhelhos, siltitos e carbonatos em diversas profundidades. Nesse poço foi descrito, em sua maioria, a presença de arenitos associados a folhelhos, siltitos e carbonatos, variando somente as respectivas proporções em certos pontos. Nos primeiros metros descritos, é encontrado majoritariamente um grande pacote de anidritas, logo em seguida, a partir da profundidade de -80m, em relação de arenitos em relação aos folhelhos é grande, porém a medida que aproxima-se da base da formação.

❖ **Poço 4-OGX-49-MA**

O poço 4-OGX-49-MA apresenta nos seus primeiros metros de profundidade na da Formação Codó uma composição muito forte de folhelhos micáceos, junto de uma aparição eventual de siltitos, carbonatos e arenitos hialinos bem selecionados. A partir da profundidade de 45 metros, a proporção de folhelhos em detrimento a outras litologias diminui (Porém continua a ser predominante), todavia o aumento litológico mais notório foi em relação ao carbonato.

❖ **Poço 1-OGX-110-MA**

No poço 1-OGX-110-MA, da mesma forma que o poço anterior, possui uma predominância de folhelhos durante toda sua coluna estratigráfica, onde no seu topo há uma presença maior de siltitos, e por volta da profundidade de 50m há um grande aumento na concentração de arenitos, tornando-os praticamente predominantes a partir dessa profundidade até 70 metros de profundidade. Por fim, na profundidade de 70 metros, os folhelhos voltam a aparecer, porém em 75 metros até praticamente a base da formação, uma grande coluna anidritica surge no perfil tornando-a predominante ao longo desse intervalo da sessão.

❖ **Poço 4-PGN-14-MA**

Os resultados observados no poço 4-PGN-14-MA representam amostras de calha com altas porcentagens de folhelhos e de siltitos com diferentes estruturas e colorações nas profundidades iniciais da Formação Codó, além da presença de arenitos predominantemente finos, hialinos e bem selecionados. Nas descrições seguintes, foram encontrados registros de anidrita a partir dos -110 metros na coluna estratigráfica. Por volta dos -125m até a base da Formação Codó, em -175m, observam-se amostras com maiores concentrações de arenitos intercalados com argilitos semelhantes e com carbonatos

6.2 Interpretações da Análise de Agrupamento (AA)

Em todos os poços foram identificados 2 grupos principais, onde o Grupo 1 (Vermelho) foi interpretado como o grupo associado aos sedimentos siliciclásticos e filossilicatos (Esmectitas, Ilitas) e o Grupo 2 (Azul) foi interpretado como evaporitos ou sedimentos com uma rica contribuição biogênica.

No Grupo 1, de maneira geral, foram visualizados elementos como: Ti, Al, Fe, Rb, Ni, Co, V e Cr. A interpretação atribuída para esse grupo é que se trata de um grupo principalmente associado aos sedimentos detríticos, comumente associados a proveniência continental, como por exemplo o crescimento de Ti e Fe que são normalmente relacionados ao aumento da erosão das rochas em áreas continentais.

No Grupo 2, na generalidade, foram identificados os elementos: Ca, Sr, Mg e Mn. É evidente interpretar que a presença de Anidrita e Calcita (CaSO_4 e CaCO_3 respectivamente) estão sempre associados ao aumento das concentrações de Ca, e a relação entre o Ca e o Sr são, na sua maioria, associados à contribuição biogênica (Baker *et al.*, 1982), além disso, sob condições mais óxicas, normalmente relacionada

ao aumento de Mn, que marca fronteiras óxicas (Roy, 1968), espécies com carapaças podem desenvolver populações maiores. A associação com o Mg pode ser interpretado como uma maior concentração de dolomitas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) no registro litológico.

Todavia, em alguns poços, elementos que foram relacionados como típicos do Grupo 2 como: Sr, Mn e Mg, foram agrupados juntos ao Grupo 1 em alguns dendogramas acima. A presença de Mg nesse grupo pode estar relacionada a uma maior presença de filossilicatos ricos em Magnésio, como Cloritas e ou uma maior erosão de rochas ígneas ricas em Mg (Diabásio). O Mn pode estar relacionado por exemplo à alteração sedimentar de uma área fonte por uma rocha ígnea rica em Manganês (Wedephol, 1960). Já o Sr pode estar relacionado a uma menor presença de calcita e/ou menor concentração de contribuição biogênica.

6.3 Interpretações dos *Proxies* Geoquímicos

Nesse trabalho foram utilizadas nove razões geoquímicas gerados pelo EDXRF (Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr, Mg/Ca, Mg/Al, Ni/Co, V/Al e V/Cr) e duas razões geradas a partir do gamaespectrômetro (Th/U_e e U/K_e). A partir desses *proxies* foram interpretadas três quimiofacies, as quais foram denominadas CD-1, CD-2 e CD-3, onde o CD-1 e o CD-3 estão mais relacionados aos elementos do Grupo 1 (Vermelho) e o CD-2 do Grupo 2 (Azul).

Sobre as razões como Fe/Ca e Ti/Ca, as interpretações que podem ser realizadas a partir delas são que, uma alta concentração de Fe e Ti em relação ao Ca permitem indicar uma maior concentração de elementos terrígenos na amostra, podendo indicar condições climáticas de maior umidade (Govin, 2012). Da mesma forma, a razão Rb/Sr também pode representar uma variação da umidade climática, visto que, o Rb por ser um metal alcalino, não possui a capacidade de criar um mineral próprio, pois, ele normalmente é encontrado como impureza nos minerais potássicos (Feldspato, Biotita, Muscovita). Esse comportamento acontece pois o raio iônico do Rb é muito parecido com o do K, e da mesma forma, o Sr (Metal Alcalino Terroso), seu raio iônico possui um valor próximo do Ca, logo, ele também tem a capacidade de substituir o Ca em minerais como calcita e apatita, apresentando as mesmas propriedades que esses elementos, além de uma mesma interpretação paleoambiental (Silva, 2006).

A razão Sr/Ca tem uma forte característica da qual é comumente utilizada para o estudo da salinidade do ambiente. De acordo com Bahr (2008), a medida que a salinidade do lago aumenta, maior é a proporção de deposição de Sr em relação ao Ca, assim, a partir dessa observação empírica, é possível afirmar que valores altos da razão Sr/Ca podem indicar um momento de maior salinidade. Vale ressaltar que só é possível realizar essa observação nas frações carbonáticas.

Outra razão que também é muito utilizada em sedimentos carbonáticos é a razão Mg/Ca. Para compreender essa razão, é necessário assimilar que durante o processo de evaporação de águas superficiais hipersalinas, os primeiros evaporitos a serem depositados são normalmente rochas associadas ao elemento Ca (Calcita). Dessa forma, os carbonatos seguintes mais ricos em magnésio (Calcita Magnésiana, Aragonita e dolomita) serão depositados subsequentes em condições mais salinas, ou seja, a partir do momento que os depósitos passam a sofrer dolomitização (Razão Mg/Ca aumenta), é possível afirmar que as condições do meio passam a ficar mais salinas (Farias, 2018).

Poço 1-OGX-93-MA:

No poço 1-OGX-93-MA (Figura 33) foram identificadas duas quimiofacies, onde é possível identificar alguns ciclos:

CD-2

- Inicia-se com valores reduzidos das razões Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca;
- Uma alta variação da razão Mn/Al;
- As razões Ni/Co, V/Al e V/Cr permanecem estáveis durante toda essa quimiofacies com um leve aumento para o topo;
- Uma pequena separação entre as razões Th/U e U/K e com *crossovers* pontuais.

Essa sequência pode ser descrita como um afogamento com criação de espaço de acomodação sobre deltas da Formação Corda. Formação de lagunas devido às oscilações do nível do mar relativo. Progressiva aridez do clima com ocasionais aportes sedimentares siliciclásticos e aumento da taxa de evaporação, causando a

precipitação de carbonatos nas porções lagunares mais profundas e de sais nas porções lagunares mais rasas. Condições mais redutoras na base da sequência, aumentando a oxidação para o topo.

CD-3:

- Elevação gradual das razões Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca;
- Uma pequena redução dos valores de Mn/Al;
- Aumento dos valores de Ni/Co, V/Al e V/Cr;
- Pequena separação entre as razões Th/U e U/K e com um ponto de *crossover*.

A partir desses *proxies*, essa sequência foi descrita como ocupação do espaço de acomodação através do avanço sedimentar (progradação), com maior aporte de siliciclásticos, principalmente folhelhos e siltitos relacionados às porções distais de deltas e estuários. Progressivo aumento da umidade do clima com aumento da taxa de evaporação e aumento da conectividade marinha, em função da maior conexão com os mares recém formados após a ruptura do Gondwana. Oscilação nas condições *redox*, prevalecendo condições mais óxicas no meio da sequência.

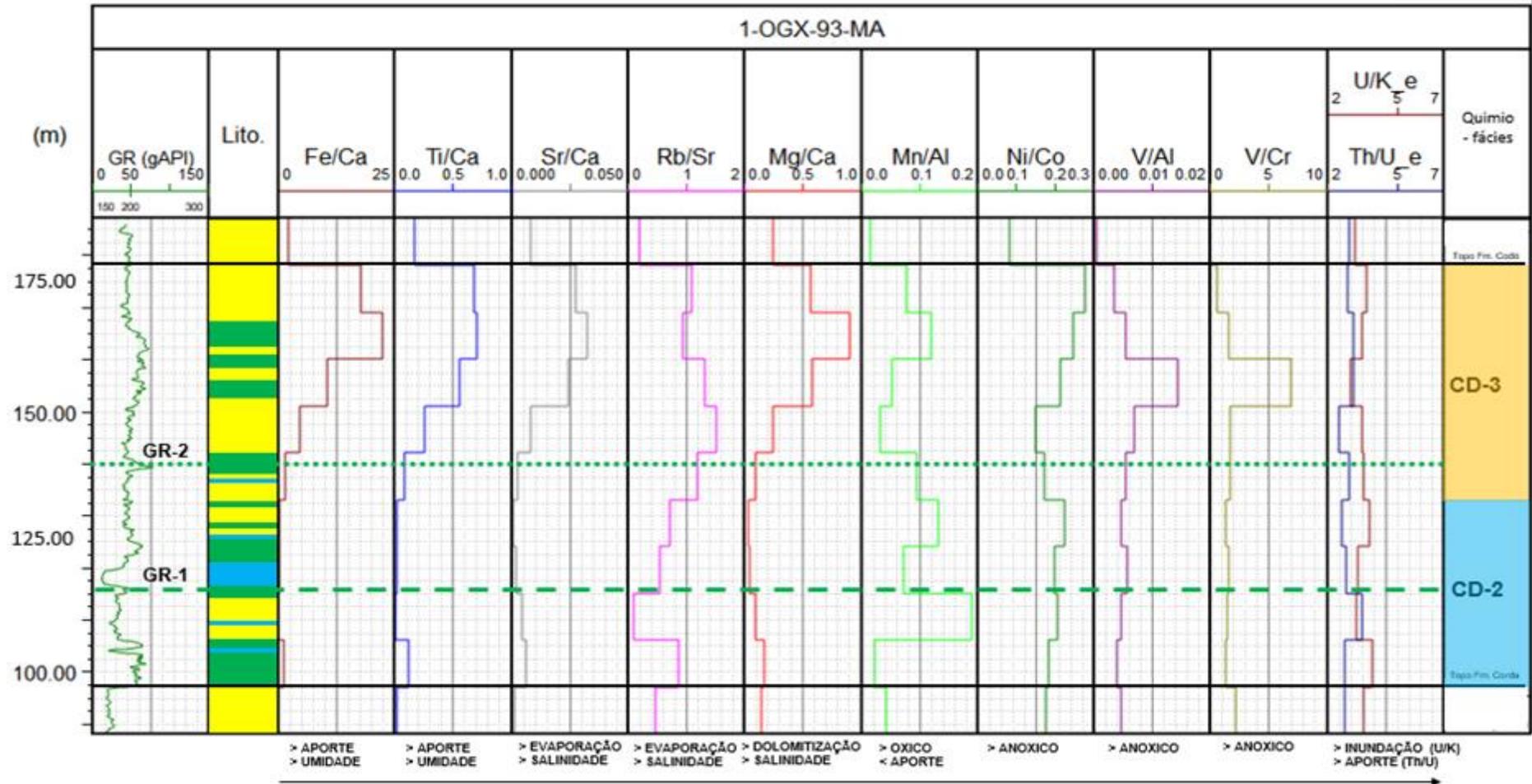
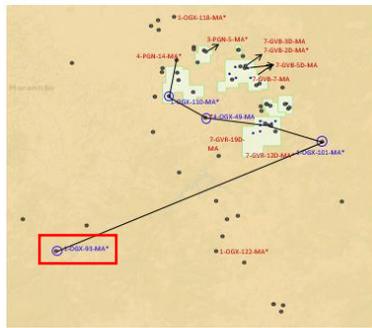


Figura 33: Poço 1-OGX-93-MA ajustado em cota (MR = 214 m) com dados de amostra de calha, GR, GRE, Geoquímicos e quimiofacies (EDXRF), GR-1 e GR-2 são dois marcos característicos do GR encontrado em todos os poços estudados. Os dados de Cáliper não foram cedidos para esse estudo. Fonte: Elaboração Própria

Poço 1-OGX-101-MA:

No poço 1-OGX-101-MA (Figura 34) foram identificadas 3 quimiofacies:

CD-1

- As razões Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca iniciam com valores altos;
- Valores muito reduzidos de Mn/Al;
- Pequeno aumento das razões Ni/Co, V/Al e V/Cr para o topo;
- Um grande aumento da separação da razão Th/U e U/K para o topo, com um momento eventual de *crossover*.

Nessa quimiofacies, interpreta-se um afogamento em direção ao topo, com criação de espaço de acomodação a Formação Corda, forçando a retrogradação dos sedimentos siliciclásticos. Provável desenvolvimento de uma superfície de inundação máxima, refletida em uma maior concentração de urânio. Progressiva aridez do clima com ocasionais aportes sedimentares siliciclásticos e aumento da taxa de evaporação. Condições mais anóxicas na base da sequência, aumentando a oxidação para o topo.

CD-2

- Uma queda considerável dos valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca;
- Um grande pico inicial dos valores de Mn/Al, V/Al e V/Cr e após isso uma queda gradual para o topo;
- Um crescimento gradual dos valores de Ni/Co para o topo;
- Uma diminuição da diferença entre a razão Th/U e U/K para o topo.

Nessa sequência foi possível identificar um afogamento com criação de espaço de acomodação; formação de lagunas devido às oscilações do nível relativo do mar. Progressiva aridez do clima e aumento da taxa de evaporação, causando a precipitação de carbonatos nas porções lagunares mais profundas e de sais nas porções lagunares mais rasas. Condições mais óxicas na base da sequência, aumentando a anoxia para o topo, provavelmente relacionada a maior restrição da laguna. Aumento gradual do aporte sedimentar para o topo, com a chegada de sedimentos detríticos distais.

CD-3

- Aumento das razões Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca para o topo;
- Redução da razão Mn/Al, V/Al e V/Cr;
- Redução dos valores da razão Ni/Co;
- Uma diminuição maior da diferença dos valores de Th/U e U/K, porém com um pequeno aumento nos valores de Th/U e redução de U/K na amostra de -20m.

A última quimiofacies identificada no poço 1-OGX-101-MA foi interpretada como uma ocupação do espaço de acomodação através do avanço sedimentar (progradação), com maior aporte de siliciclásticos, principalmente folhelhos e siltitos relacionados às porções distais de deltas e estuários. Progressiva anoxia, provavelmente ocasionada por uma alta taxa de sedimentação.

7-GVB-12D-MA:

No poço 7-GVB-12D-MA (Figura 35) foram identificados duas quimiofacies:

CD-1

- Houve um aumento dos valores das razões Fe/Ca, Ti/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca, com um eventual pico próximo a profundidade de -100 m;
- Nessa sessão os valores de Sr/Ca estavam estagnados próximos a zero. Mais próximo ao topo os valores possuem um pequeno aumento;
- Os valores de Mn/Al e V/Al possuem um grande crescimento essa sessão, porém ao final da mesma há uma queda abrupta de valores dessa razão;
- Os valores de Ni/Co apresentam uma leve variação durante toda essa sessão, porém a tendência da mesma é ascendente;
- A razão V/Cr possui um pequeno crescimento nas regiões mais inferiores da sequência, porém nos limites mais superiores apresenta uma pequena queda de seus valores;
- Por fim, os valores de Th/U e U/K possuem um espaçamento bem grande entre eles, com uma eventual aproximação, porém não suficiente para criar um *crossover*.

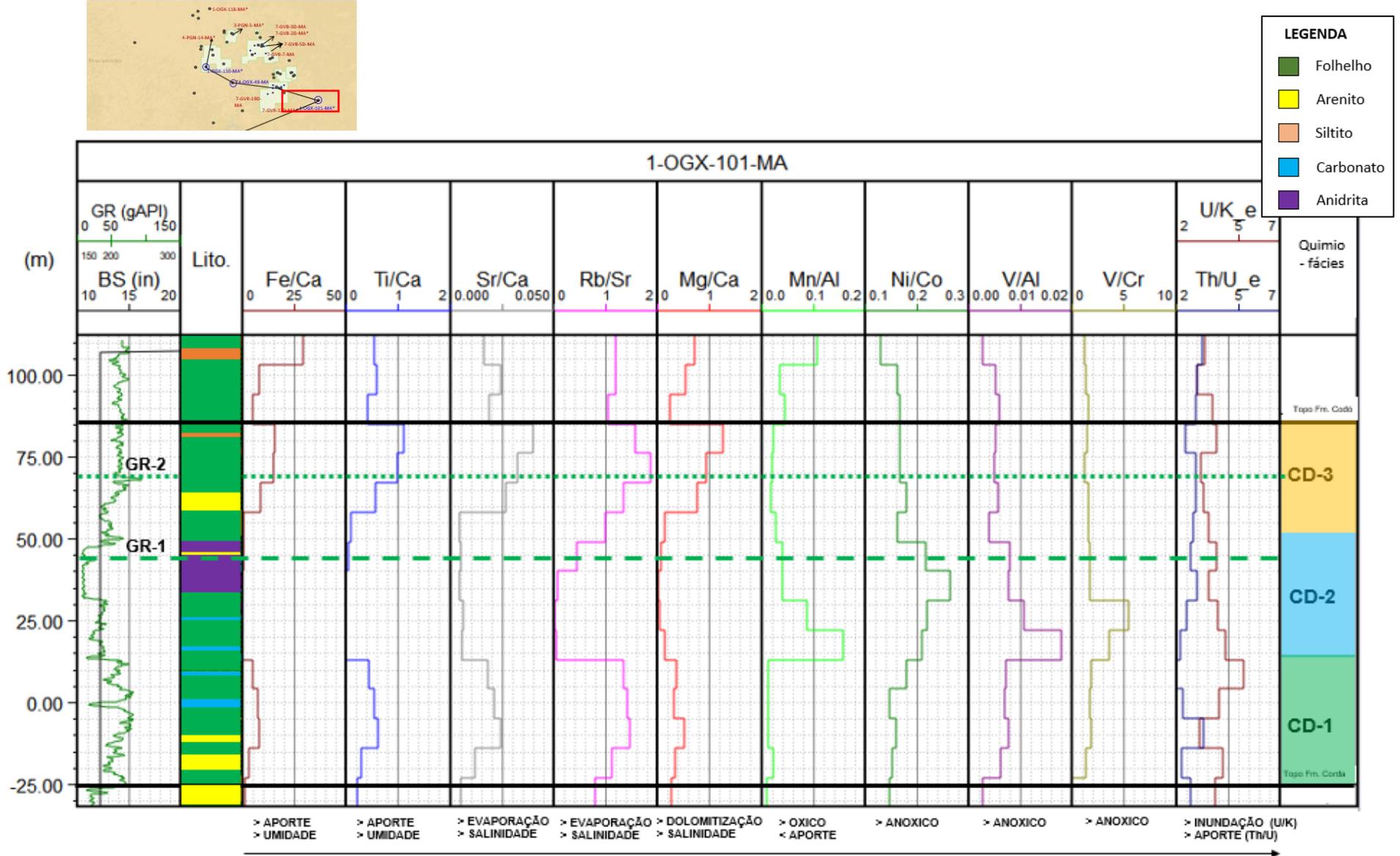


Figura 34: Poço 1-OGX-101-MA ajustado em cota (MR = 121 m) com dados de amostra de calha, GR, GRE, Geoquímicos e quimiofacies (EDXRF), GR-1 e GR-2 são dois marcos característicos do GR encontrado em todos os poços. Os dados de Cáliper não foram cedidos para esse estudo. Fonte: Elaboração Própria

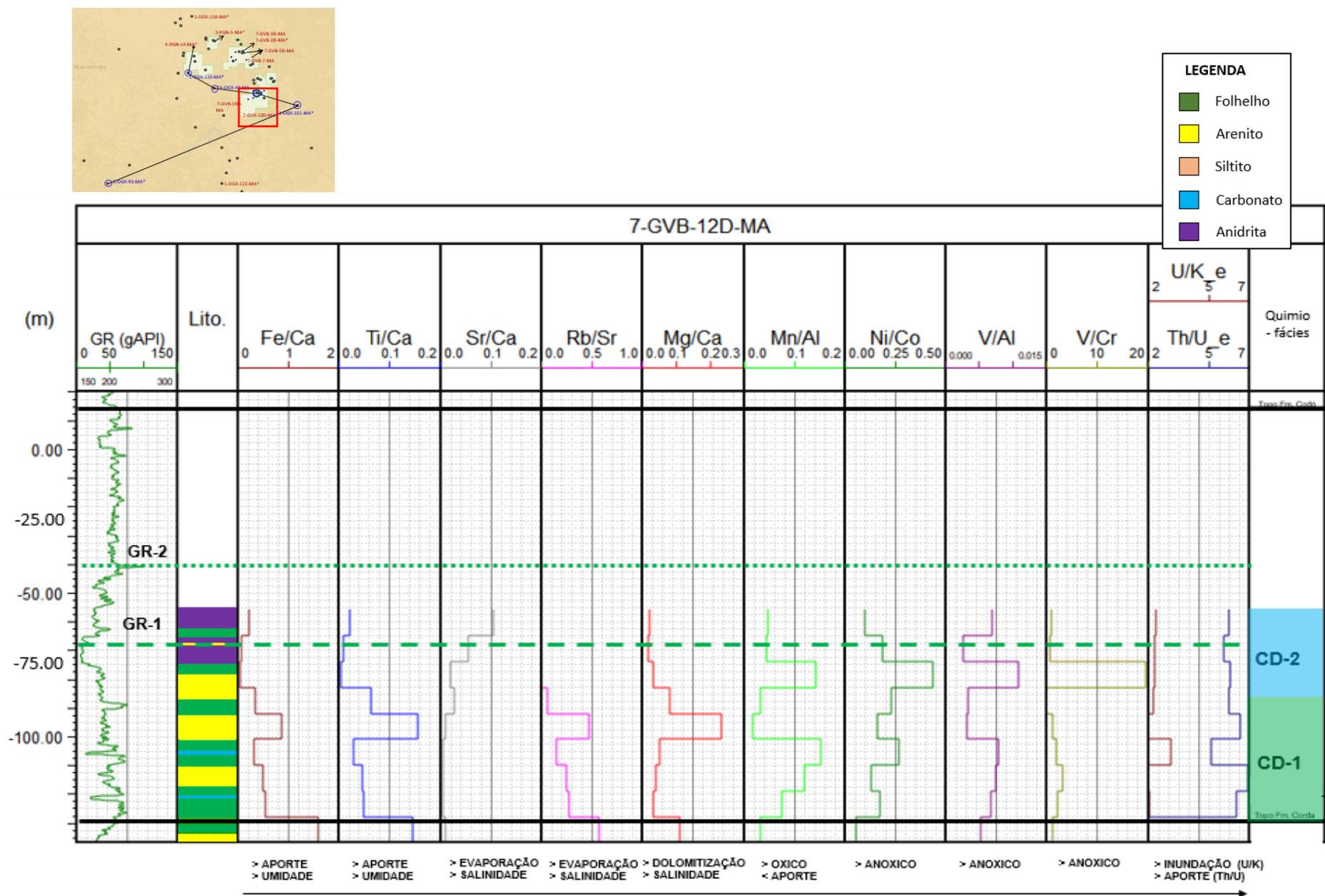


Figura 35: Poço 7-GVB-12D-MA ajustado em cota (MR = 61 m) com dados de amostra de calha, GR, GRE, Geoquímicos e quimiofácies (EDXRF), GR-1 e GR-2 são dois marcos característicos do GR encontrado em todos os poços. Os dados de Cáliper não foram cedidos para esse estudo. Fonte: Elaboração Própria.

Nessa sequência, foi interpretado um afogamento em direção ao topo, com criação de espaço de acomodação sobre deltas da Fm. Corda, impondo a retrogradação dos sedimentos siliciclásticos, com alguns pulsos progradantes. Progressiva aridez do clima com ocasionais aportes sedimentares siliciclásticos. Condições mais óxicas na base da sequência, aumentando a anoxia para o topo.

CD-2

- Nessa sessão os valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Mg/Ca e Rb/Sr passam por uma grande redução para valores próximos a 0;
- A razão Sr/Ca passa por um leve aumento em direção ao topo da sequência;
- Os valores de Mn/Al, Ni/Co e V/Cr possuem um grande pico na base da quimiofacies e após esse grande pico, os valores voltam a cair drasticamente para o topo;
- Os valores de V/Al também apresentam inicialmente um grande pico na base da sequência, e após a mesma há uma pequena queda, todavia no topo da quimiofacies os valores tornam a subir;
- Durante toda essa sequência os valores de Th/U e U/K permanecem com um grande afastamento, sem muitas alterações no decorrer da sessão.

Nessa porção, houve um afogamento com criação de espaço de acomodação. Formação de lagunas devido às oscilações do nível relativo do mar. Progressiva aridez do clima e aumento da taxa de evaporação, causando a precipitação de carbonatos nas porções lagunares mais profundas e de sais nas porções lagunares mais rasas. Condições mais anóxicas na base da sequência, aumentando a oxia para o topo, provavelmente relacionada à diminuição de condições restritas. Aumento gradual do aporte sedimentar para o topo, com a chegada de sedimentos detríticos (Th/U).

4-OGX-49-MA:

No poço 4-OGX-49-MA (Figura 36) foram identificadas duas quimiofaciess:

CD-2

- Nessa primeira sequência, os valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca apresentam valores muito baixo durante todo esse intervalo e sem grandes variações;
- Nesse intervalo, os valores de Mn/Al e V/Al possuem um grande pico na base da sequência, porém em direção ao topo, os valores começam a perder intensidade;
- Os valores de Ni/Co e V/Cr têm em sua base valores mais reduzidos e ao final há um pequeno pico em seus valores;
- Por fim os valores de Th/U e U/K na base da sessão possuem um espaçamento maior, porém ao se aproximar do topo da sequência, essa diferença se torna um pouco menor.

Nessa quimiofacies, a interpretação indica afogamento com criação de espaço de acomodação. Formação de lagunas devido às oscilações do nível relativo do mar. Progressiva aridez do clima e aumento da taxa de evaporação, causando a precipitação de carbonatos nas porções lagunares mais profundas e de sais nas porções lagunares mais rasas. Condições variáveis de anoxia. Aumento gradual do aporte sedimentar para o topo, com a chegada eventual de sedimentos detríticos (Th/U). Possui uma superfície de inundação na base da sequência (U/K).

CD-3

- Os valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca possuem um grande aumento na base da quimiofacies, porém após atingir um pico por volta dos 60 m, os valores passam a ter uma tendência de descensão;
- Também nessa sequência os valores de Mn/Al e V/Cr passam por uma grande queda, onde passam a ter valores próximos de 0 até o topo da sessão;
- Os valores de Ni/Co e V/Al passam estagnam em valores não muito altos e permanecem em valores próximos, sem muita variação, até o topo da sequência;

- Por fim, os valores de Th/U e U/K durante toda a sequência não passa por grandes variações, somente com um eventual maior afastamento dos gráficos em regiões mais próximas ao topo do poço.

Nesse intervalo do poço, a partir dos dados geoquímicos, a interpretação sugere que houve uma ocupação do espaço de acomodação através do avanço sedimentar (progradação), com maior aporte de siliciclásticos, principalmente folhelhos e siltitos relacionados às porções distais de deltas e estuários. Progressivo aumento da oxigenação para o topo, provavelmente ocasionada por uma menor condição restritiva. A umidade do clima aumenta progressivamente para o topo.

1-OGX-110-MA:

No poço 1-OGX-110-MA (Figura 37) foram identificadas duas quimiofaciess:

CD-2

- Nesse primeiro momento é possível visualizar que os valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca estão muito baixos, porém há uma leve tendência de aumento das mesmas para o topo da sessão;
- Nesse intervalo, os valores de Mn/Al e V/Al estão relativamente altos durante toda sequência;
- Os valores de Ni/Co e V/Cr inicialmente estão relativamente baixos, porém possuem uma tendência de ascensão para o topo;
- Por fim, os valores de Th/U e U/K permanecem praticamente constantes durante toda a sequência, com um afastamento significativo entre eles.

Nessa superfície, foi interpretado um afogamento com criação de espaço de acomodação. Formação de lagunas devido às oscilações do nível relativo do mar. Progressiva aridez do clima e aumento da taxa de evaporação para o topo, causando a precipitação de carbonatos nas porções lagunares mais profundas e de sais nas porções lagunares mais rasas, com eventuais descargas fluviais trazendo areias. Aumento da anoxia para o topo.

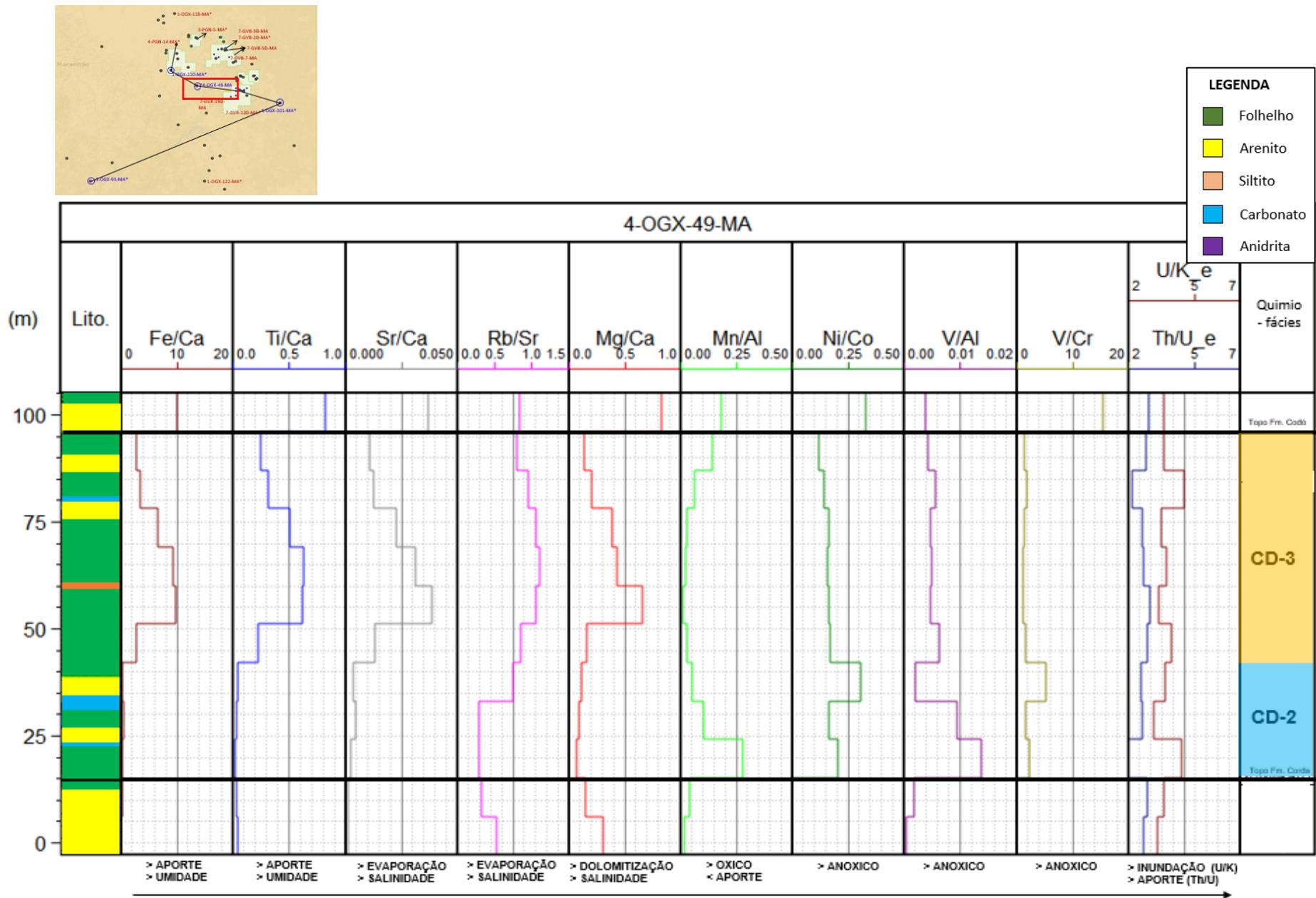


Figura 36: Poço 4-OGX-49-MA ajustado em cota (MR = 114 m) com dados de Gama Ray, Gama Ray Espectral e Geoquímicos (EDXRF), GR-1 e GR-2 são dois marcos característicos do GR encontrado em todos os poços. Os dados de Cáliper e GR não foram cedidos para esse estudo Fonte: Elaboração Própria.

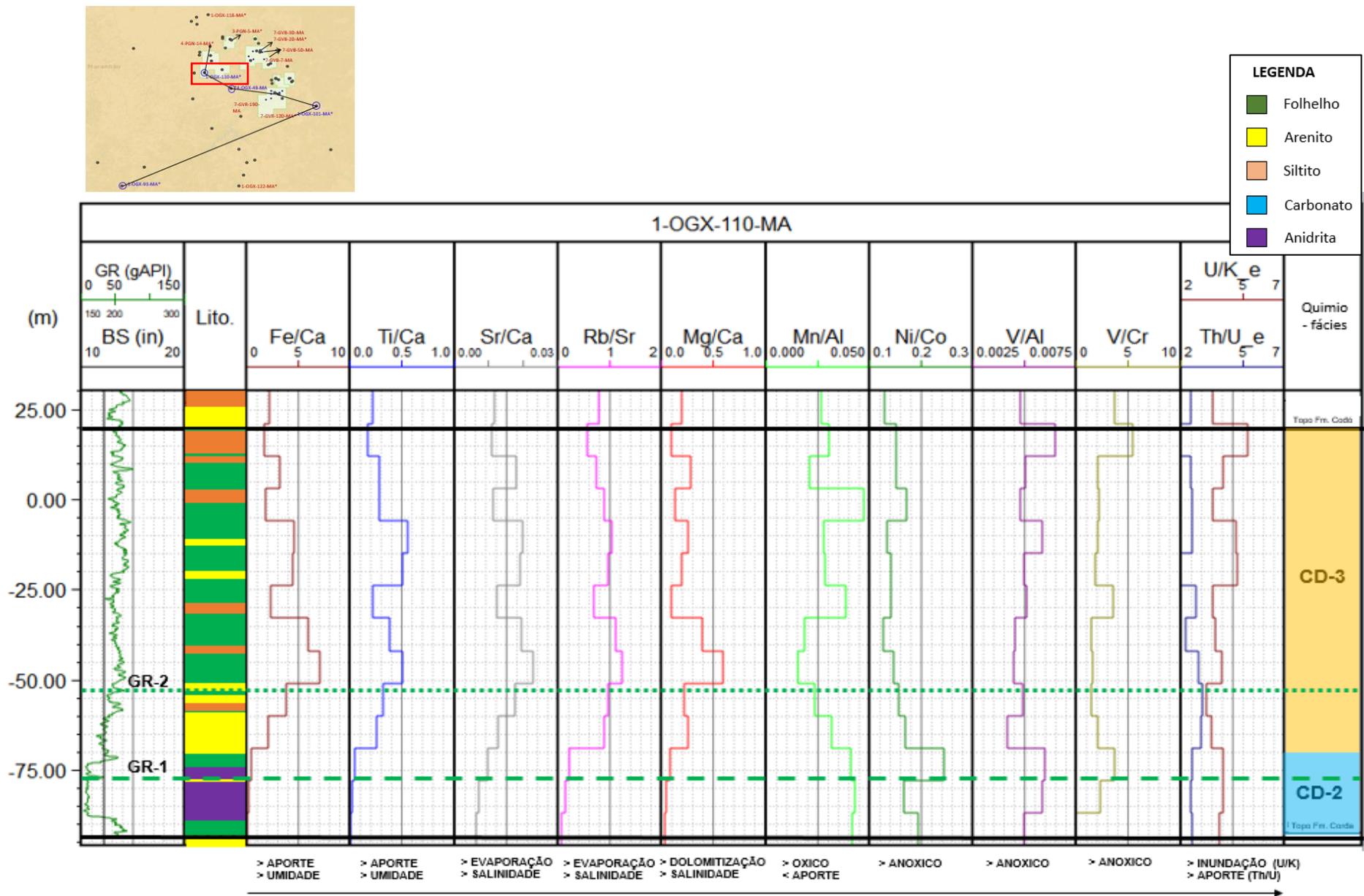


Figura 37: Poço 1-OGX-110-MA ajustado em cota (MR = 93 m) com dados de Amostra de calha, Gama Ray, Gama Ray Espectral e Geoquímicos (EDXRF), GR-1 e GR-2 são dois marcos característicos do GR encontrado em todos os poços. Os dados de Cáliper não foram cedidos para esse estudo Fonte: Elaboração Própria

CD-3

- Nesse intervalo, as curvas de Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca inicialmente seguem uma tendência de ascensão, até um determinado período, onde a partir da metade do poço até o seu topo, essa tendência se altera e as razões começam a declinar;
- As razões Mn/Al, V/Al e V/Cr possuem uma queda significativa nos valores próximos à base da quimiofacies, porém a partir da metade do poço a tendência passa a ser de crescimento até o topo, e com eventuais picos positivos na curva;
- A curva de Ni/Co inicialmente possui valores com tendências de decréscimo no início do intervalo, porém chegando mais próximo do topo a razão Ni/Co passa a ser praticamente constante até a superfície da formação;
- Já nos valores de Th/U e U/K, inicialmente há uma redução da diferença dos seus valores, fazendo com que os valores das razões se aproximem, porém a partir de um dado momento (A partir de 50m), a tendência dos gráficos volta a ser de afastamento, com eventuais aproximações, para o topo.

Nessa quimiofacies a interpretação indica uma ocupação do espaço de acomodação através do avanço sedimentar (progradação), com maior aporte de siliciclásticos, relacionados deltas e estuários, com uma ligeira retrogradação. Prevaecem condições mais óxicas para o topo. A umidade do clima aumenta progressivamente para o topo, diminuindo a taxa de evaporação.

4-PGN-14-MA:

Foi identificado no poço 4-PGN-14-MA (Figura 38) 3 quimiofaciess:

CD-1

- Inicialmente, os valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr apresentam valores relativamente baixos, mas suas tendências para o topo dessa quimiofacies é de um pequeno crescimento;
- As razões Mg/Al e V/Al iniciam essa sequência com valores altos, porém à medida que se aproxima do topo da sessão, os valores das mesmas tornam-se cada vez menores;
- Os valores de Ni/Co e V/Cr permanecem praticamente constantes em toda a sessão, com eventuais picos positivos e negativos durante essa quimiofacies;
- Já as razões Th/U e U/K inicialmente têm uma tendência de um maior afastamento, porém nas porções mais superiores, os valores das razões voltam a ficar um pouco mais próximos.

Afogamento em direção ao topo, com criação de espaço de acomodação sobre deltas da Fm. Corda, compelindo a retrogradação dos sedimentos siliciclásticos. Provável desenvolvimento de uma superfície de inundação máxima, refletida numa maior concentração de urânio (-150m). Progressiva aridez do clima para o topo, com ocasionais aportes sedimentares siliciclásticos e aumento da taxa de evaporação. Condições mais anóxicas na base da sequência, aumentando a oxidação para o topo.

CD-2

- Nessa sessão, os valores de Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca e Mg/Ca possuem uma forte redução, aproximando-se de valores próximos a 0;
- Razões como Rb/Sr e Ni/Co inicialmente têm um grande pico negativo na base dessa sessão, porém os valores tornam a crescer nas porções mais superiores;
- Os valores de Mn/Al, V/Al e V/Cr possuem valores relativamente maiores nessa sessão e os valores permanecem praticamente constantes até o todo da CD-2;

- Nessa sessão, as razões Th/U e U/K passam a ter valores inicialmente mais próximos, porém em profundidades mais superiores, os gráficos voltam a se afastar um em relação ao outro.

Nessa sessão, foram identificadas feições de afogamento com criação de espaço de acomodação. Formação de lagunas devido às oscilações do Nível Relativo do Mar (NRM) relativo. Progressiva aridez do clima e aumento da taxa de evaporação para o topo, causando a precipitação de carbonatos nas porções lagunares mais profundas e de sais nas porções lagunares mais rasas, com eventuais descargas fluviais trazendo areias. Aumento da anoxia para o topo.

CD-3

- As razões Fe/Ca, Ti/Ca, Sr/Ca, Rb/Sr e Mg/Ca possuem uma tendência de crescimento durante essa última quimiofacies;
- Os valores de Mn/Al, V/Al e V/Cr passam a ter a partir dessa sessão uma tendência de decréscimo até o topo da formação;
- Os valores de Ni/Co caem ligeiramente inicialmente e após essa queda, passam a ter valores constantes até o topo;
- Por fim, os valores de Th/U e U/K passam a ter distanciamento um pouco maior, em relação a sessão anterior, e os valores permanecem praticamente inalterados durante toda quimiofacies.

Por último, a interpretação dada para o CD-3 desse poço foi que houve uma ocupação do espaço de acomodação através do avanço sedimentar (progradação), com maior aporte de siliciclásticos, relacionados deltas e estuários, principalmente fácies distais. Prevaecem condições mais anóxicas para o topo. Altas taxas de evaporação podem indicar um raseamento para o topo.

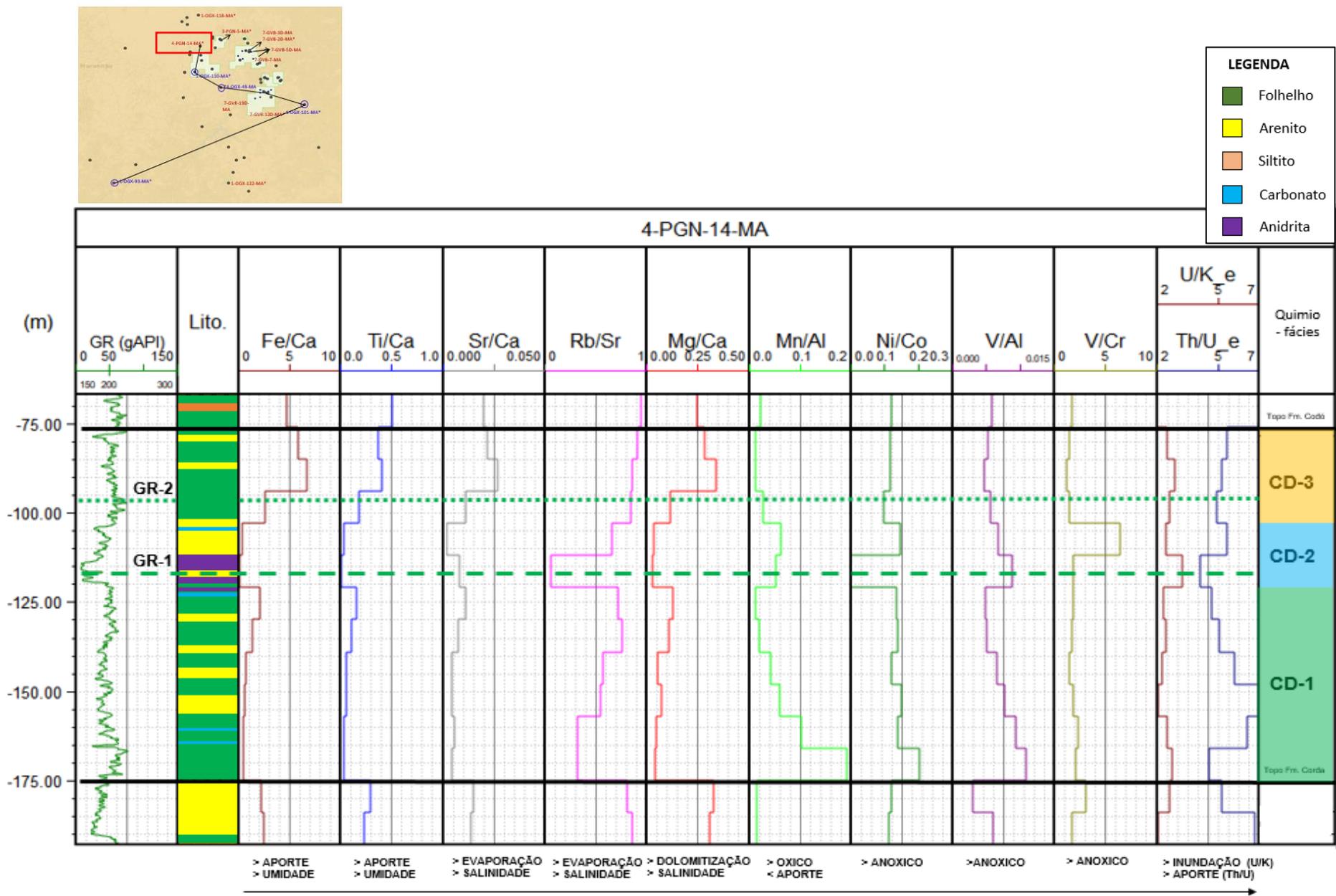


Figura 38: Poço 4-PGN-14-MA ajustado em cota (MR = 50 m) com dados de Amostra de calha, Gama Ray, Gama Ray Espectral e Geoquímicos (EDXRF), GR-1 e GR-2 são dois marcos característicos do GR encontrado em todos os poços. Os dados de Cáliper não foram cedidos para esse estudo. Fonte: Elaboração Própria

6.4 Correlações dos Dados

Para a correlação de dados (Figura 39), foi utilizado principalmente as curvas de GR, e as curvas das razões geoquímicas geradas, além da litologia interpretada. Foi observado nas curvas de GR dois picos característicos identificados em todos os poços, que foram denominados de GR-1 e GR-2, onde cada um deles eram sempre identificados nas quimiofacies CD-2 e CD-3, respectivamente.

A correlação dos poços, seguindo uma linha arbitrária unindo os poços selecionados de SW (OGX-93) a NE (OGX-101), inflexionando para NW através dos poços GVB-12D, OGX-49, OGX-110 e PGN-14 (Figura 36 – Mapa), sugere que a quimiofacies CD-1 está ausente nos poços OGX-93, OGX-49 e OGX-110. Considerando a grande distância entre os poços OGX-93 e os demais, deve-se ter cautela na interpretação envolvendo este poço.

Considerando os demais, por estarem mais próximos, é possível inferir que a Fm. Codó possui na sua base a quimiofacies CD-1, de padrão retrogradacional, caracterizada nos poços: OGX-101, GVB-12D e PGN-14, como sendo uma sequência retrogradacional, observando-se um aumento das taxas de evaporação, pontuada por alguns eventos progradantes, que podem estar relacionados a eventos climáticos de maior umidade). A ausência da quimiofacies CD-1 nos poços OGX-93, OGX-49 e OGX-110 pode ser atribuída a uma possível não-deposição, por se tratarem de paleo-elevações, ou a uma posterior erosão, causada por eventuais soerguimentos relacionados à falhamentos tectônicos.

A quimiofacies CD-2 está presente em todos os poços e sugere que a parte intermediária da Fm. Codó possui um caráter agradacional, com a presença de anidritas e carbonatos, apesar de altas taxas de oxigenação, inferidos pelos elevados índices de Mn em todos os poços nesse intervalo. Com as variações constantes do nível relativo do mar (NMR), houve também a formação de uma grande laguna, permanecendo, assim como a quimiofacies CD-1, um ambiente árido, propiciando a precipitação de evaporitos e a menor presença de materiais siliciclásticos. Vale ressaltar que poços como OGX-93 e OGX-49 não apresentaram Anidrita nos seus intervalos, podendo ser interpretados como regiões mais profundas da laguna.

A quimiofacies CD-3, de caráter progradacional, também está presente em todos os poços estudados (Apesar de não conter esses dados no poço GVB-12D,

induz-se que o CD-3 esteja presente devido à presença do marco GR-2 na curva do Gama Ray) e, a partir desse ponto, a umidade aumenta gradativamente além das condições do ambiente voltaram a ser mais anóxicas para o topo.

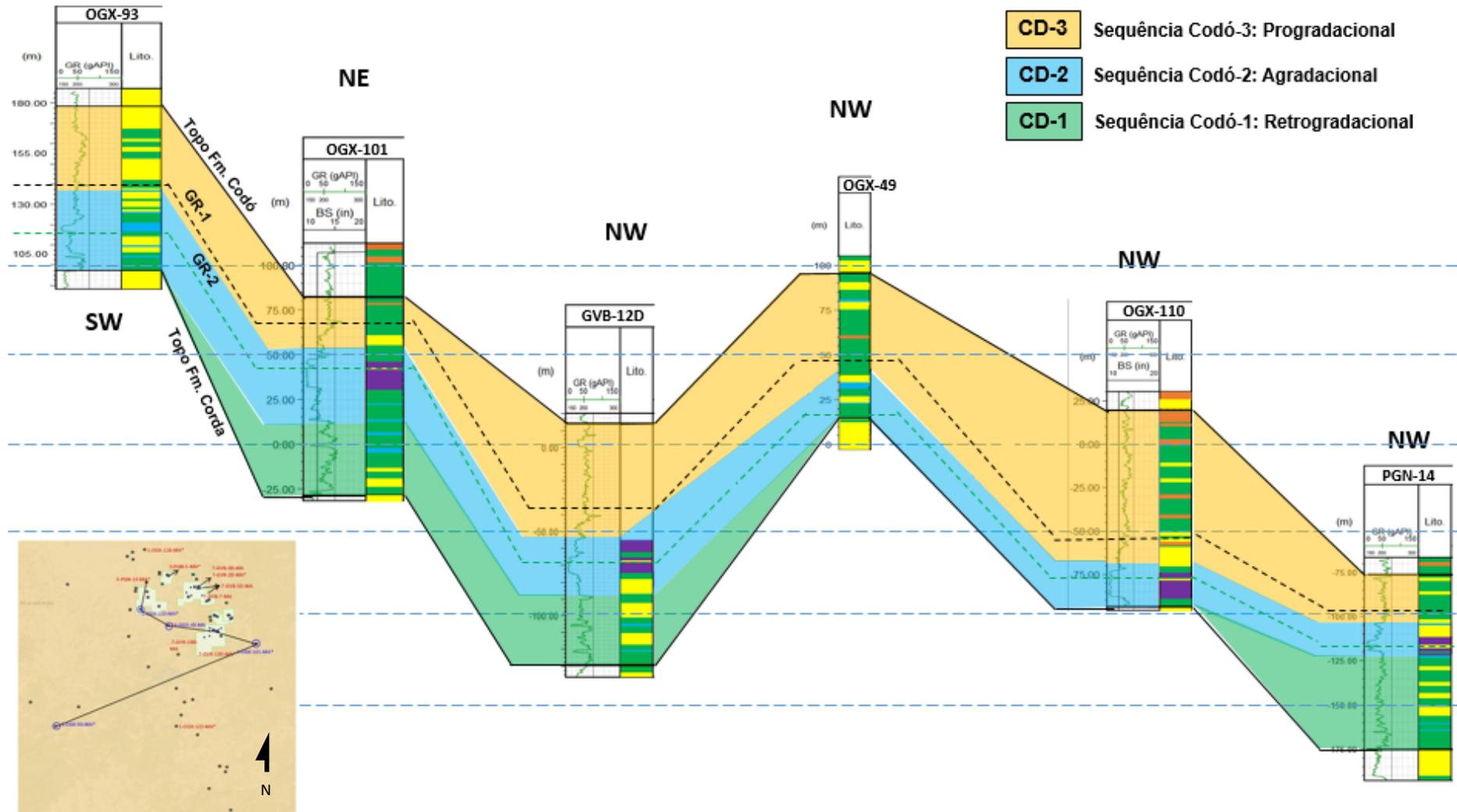


Figura 39: Correlação dos poços a partir dos dados de GR e das sessões quimioestratigráficas. Fonte: Elaboração própria,

7 CONCLUSÕES

A integração rocha-perfil-geoquímica permitiu inferir condições paleoambientais e paleodeposicionais na Fm. Codó, durante a passagem Aptiano-Albiano na região do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. De acordo com os resultados gerados nesse trabalho, infere-se que a passagem Aptiano-Albiano ocorreu de forma gradual, e não de maneira abrupta.

Foram identificadas três quimiofacies, nas quais as proxies geoquímicas e a curva de GR auxiliaram na correlação de seis poços. Esta correlação sugere que a evolução da passagem Aptiano-Albiano ocorreu em diferentes condições paleodeposicionais, em um ambiente lagunar com regiões mais rasas e mais profundas, com a presença de evaporitos na quimiofacies CD-2, ocorrendo anidrita nas zonas mais rasas e carbonatos nas porções mais profundas. Essas condições paleobatimétricas também influenciaram as condições redox, influenciada por possíveis conexões com o mar em abertura.

Recomenda-se a utilização dessas proxies associadas a outras. Esta metodologia propiciará uma ferramenta de baixo custo operacional, capaz de conferir maior robustez aos estudos estratigráficos, otimizando a exploração petrolífera.

8 REFERÊNCIAS

AGUIAR, G. A., **Revisão geológica da bacia paleozoica do Maranhão.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25. São Paulo. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. v. 3, p.113-122. (1971).

ALBUQUERQUE, O. R., DEQUECH, V., **Contribuição para a Geologia do Meio-Norte, especialmente Piauí e Maranhão, Brasil.** In: Congresso Pan-Americano de Engenharia de Minas e Geologia. Petrópolis. Anais, V.3, p 69-109. (1946).

ALMEIDA, F. F. M., CARNEIRO, C. D. R., **Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados.** In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca. P.43-58.(2004).

ANAISSE JÚNIOR, J.; TRUCKENBRODT, W.; ROSSETTI, D. F., **Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, Área de Açailândia – MA, Bacia do Grajaú.** In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi. p.119-150 (2001).

ARAI, Mitsuru., **Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective.** Brazilian Journal of Geology, v. 44(2): 339-350, June (2014).

ARAÚJO L.M., TRIGÜIS J.A., CERQUEIRA J.R. & FREITAS L.C. DA S. 2000. **The Atypical Permian Petroleum System of the Paraná Basin, Brazil.** In: Mello M.R. & Katz B.J. (eds.) Petroleum Systems of South Atlantic Margins. AAPG Memoir, 73:377-402.

ARZ, H. W., PATZOLD, J., WEFER, G., **Correlated Millennial-Scale Changes in Surface Hydrography and Terrigenous Sediments Yield Inferred from Last-Glacial Marine Deposits of Northeastern Brazil.** ScienceDirect, v. 166,p. 157-166. (1998).

BAHR, A., LAMY, F., ARZ, H. W., MAJOR, C., KWIECIEN, O., WEFER, G., **Abrupt changes of temperature and water chemistry in the late Pleistocene and early Holocene Black Sea.** Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol.9, N° 1 (2008).

BAKER, P.A., Gieskes, J. M., **Diagenesis of Carbonates in Deep-Sea Sediments-- Evidence From SR/CA Ratios and Interstitial Dissolved SR²⁺ Data.** *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 52. doi:10.1306/212f7ee1-2b24-11d7-8648000102c1865d (1982).

BASTOS, L. P. H., CAVALCANTE, D. C., PEREIRA, E., RODRIGUES, R., **Estratigrafia química aplicada à Formação Codó nos furos de sondagem UN-24-PI e UN-37-PI (Aptiano/Albiano da Bacia do Parnaíba).** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 289-312, jul./dez. (2014).

BLOEMSMA, M.R. et al., **Modelling the joint variability of grain size and chemical composition in sediments.** *Sedimentary Geology* 280, 135-148, (2012).

BOUROCHE, J. M., SAPORTA, G., **Análise de Dados.** Zahar Editores. Rio de Janeiro (1982).

CALONIO, L. W., **Influência de pirita e argilominerais nos cálculos de saturação da Fm. Poti, Bacia do Parnaíba: Um estudo de caso no Poço 3-PGN-5-MA.** Instituto de Geociências – Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra – Universidade Federal Fluminense (2020).

CALVERT, S. E., PEDERSEN, T. F., **Elemental proxies for paleoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: interpretation and application.** v. 1, n. 7, p. 567-644, (2007)

CAPUTO, M. V.; **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil.** Santa Barbara, University of California. PhD Thesis. 583p.(1984).

CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C., **Estratigrafia, Idade e Correlação do Grupo Serra Grande.** In. Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, SBG. v.2.(1984).

CPRM, **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.** (1995)

CROUDACE, I. W., et. al., **XRF studies of sediment cores: applications of a non-destructive tool for the environmental sciences.** Dordrecht (Netherlands). Springer (2015).

DE MORAES, A. S., TECH, L., MELQUÍADES, F. L., & BASTOS, R. O. (2014). **Energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) equipment calibration for multielement analysis of soil and rock samples.** doi:10.1063/1.4901775

DIAS, G. P., **Avaliação das Condições Redox das águas intermediárias do Oceano Atlântico Sudoeste nos últimos 40 mil anos.** Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Mestrado em Ciências, área de Oceanografia Química (2018).

FARIAS, F. A. - **Petrogênese de Carbonatos Acamadados da Formação Barra Velha, Aptiano da Bacia de Santos.** Universidade Federal do Paraná – Brasil, (2018).

FERNANDES, R.F., **Estudo da evolução termomecânica da Bacia do Parnaíba.** Regina Freitas Fernandes. – Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE (2011).

FERREIRA, A. L., **Bacia do Parnaíba, Seminário Técnico, Superintendência de Definição de Blocos, Rodada 15 Concessões de Petróleo e Gás.** Agência Nacional do Petróleo (2018).

FERRETI, M., **Princípios e Aplicações de espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais.** Revista CPC, São Paulo, n. 7, pp. 74-98 (2008).

FILHO, I. O. P., **Avaliação Petrofísica do Reservatório Poti no poço 3-PGN-5-MA – Campo de Gavião Cabloco, Bacia do Parnaíba.** Instituto de Geociências – Departamento de Geologia e Geofísica – Universidade Federal Fluminense (2019).

GARRISON, T., **Fundamentos de Oceanografia.** 4ª Edição, CENGAGE Learning (2010).

GÓES, A. M. O., **Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, doi: 10.11606/T.44.1995.tde-11022014-105309 (1995).

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J., **Bacia do Parnaíba, Boletim de Geociências da Petrobrás.** Rio de Janeiro, 8 (1): 57-67, Jan/Mar.(1994).

GÓES, A. M. O., TRAVASSOS, W. A., NUNES, K. C., **Projeto Parnaíba – Reavaliação da Bacia e perspectivas exploratórias.** Belém , Petrobras. Rel. Interno. (1992)

GOVIN, A. et al., **Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N–49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering.** *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.*13(1),1525-2027. (2012).

GROTZINGER, J. & JORDAN, T., **Para Entender A Terra. 6ª Edição,** Bookman, Porto Alegre. 768 p. (2013).

HUANG, Z., WANG, X., YANG, X., ZHU, R., CUI, J., SHI, W., ZHU, Y., **Paleoenvironment and Organic Matter Accumulation of the Upper Ordovician-Lower Silurian, in Upper Yangtze Region, South China: Constrains from Multiple Geochemical Proxies.** *Energies* 2020, 13, 858; doi:10.3390/en13040858. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radioelement mapping.** International Atomic Energy Agency, 2010.

JEKINS, R., GOULD, R. W., GEDCKE, D., **Quantitative X-ray Spectrometry.** 2nd Edition (1995)

JONES, B., MANNING, D. A. C. A., **A Comparison and correlation of different geochemical índices used for the interpretation of depositional enviroments in ancient mudstones.** *Chemical Geology*, V. 111, N. 1-4, P. 111-129 (1994).

KILLOPS, S., KILLOPS, V., **Introduction to Organic Geochemistry.** Blackwell Science Ltd, a Blackwell Publishing company (1988).

KEGEL, W.; **Contribuição para o estudo do Devoniano na Bacia do Parnaíba e Zonas adjacentes.** Rio de Janeiro. DNPM. Bol. N° 160. (1956).

LIGHT, O. A. B., *et. al.*, **Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás.** CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2007).

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaiba: integracao geologico-metalogenetica: relatorio final da etapa III.** Recife: **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.** 212 p. (1978).

LIMA, K. T. P., **Utilização de Métodos Sísmicos, Perfilagem e Testemunho de Poços para Caracterização dos Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada (BA)**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual do Norte Fluminense - p. 58 (2006).

LINDOSO, R. M., CARVALHO, I. S., MEDEIROS, M. A., PEREIRA, A. A., SANTOS, R. A. B., MENDES, I. D., BRITO, J. M., BÔAS, I. V., ARAÚJO, M.N., FERREIRA, N. N., **Novos Sítios fossilíferos em carbonatos da Formação Codó (Aptiano/Albiano) da Bacia do Parnaíba, Maranhão, Brasil**. In: Carvalho, I. S.; Srivastava, N. K.; Junior, O. S.; Lana, C. C. (eds) - Paleontologia: Cenários de Vida. - Vol. 4, Editora Interciência, pgs. 819-827. Brasil (2011).

LISBOA, M. A. R., **The Permian Geology of Northern Brazil**. New Haven, Am.Jour.of.Sci.Ser.4, v.XXXVII, n° 221. (1914).

MACHADO, J. P. O., **Avaliação do Potencial para *Shale Gas* nos Poços, 1-OGX-77-MA e 1-OGX-110-MA da Formação Pimenteiras, Bacia do Parnaíba**. Instituto de Geociências – Departamento de Geologia e Geofísica – Universidade Federal Fluminense (2019).MASSONI, P. R. - **Determinação da concentração de elementos químicos**

potencialmente tóxicos em aerossóis presentes no interior de uma pequena indústria de fundição de metais, utilizando amostrador temporal e a técnica de 87 Fluorescência de raios X. Centro de Energia Nuclear na Agricultura.Universidade de São Paulo (USP) – Brasil, 2009.

MARTINEZ-RUIZ, F., KASTNER, M., GALLEGU-TORRES, D., et. al., **Paleoclimate and Paleooceanography over the past 20,000 yr in the Mediterranean Sea Basins as indicated by sediment elemental proxies**. Quaternary Science Reviews, v. 107, p. 25-46 (2015).

MENDES, A. C., TRUCKENBRODT, W., **Proveniência de arenitos albianos (Grupo Itapecuru), borda leste da bacia de São Luís-Grajaú, Maranhão, usando análise de minerais pesados e química mineral**. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Bol. Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais, Belém, v. 4, n. 1, p. 57-74, jan.- abr.(2009).

- MESNER, J. C., WOOLDRIDGE, L. C., **Estratigrafia das Bacias Paleozóica e Cretácea do Maranhão**. Boletim Técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, 137-164, abr./jun. (1964).
- MIZUSAKI, A. M. P., **Comportamento do Rb e do Sr em sedimentos recentes. Implicações na datação radiométricas de rochas sedimentares**. Universidade de São Paulo, (1992).
- MORENO, A., CACHO, I., CANALS, M., **Millennial-scale variability in the productivity signal from the Alboran Sea record**. Western Mediterranean Sea., v. 211, p. 205-219, (2004).
- MORAES, W. P., **Geoquímica e composição isotópica de Sr do complexo granulítico Santa Maria Chico, Cráton Rio de La Plata, RS**. UFRGS – Geociências – Porto Alegre (2016).
- NERY, G. G., **Perfilagem Geofísica**. HYDROLOG Serviços de Perfilagem Ltda (2004).
- NERY, G. G., **Perfilagem geofísica em poço aberto: Fundamentos básicos com ênfase em Petróleo**. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro (2013).
- NOBRE, J. A., **Interpretação Paleodeposicional das Formações Poti e Cabeças com base em dados Gamaespectrais, obtidos em amostras de calha de poços da área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba**. Instituto de Geociências – Departamento de Geologia e Geofísica – Universidade Federal Fluminense (2019).
- OVALLE, A. R. C., ARAGON, G. T., **Dinâmica da Terra**. Consórcio CEDERJ (2010).
- PAIVA, G., **Estratigrafia da Sondagem nº 125**. Rio de Janeiro, Bol.Serv.Form.Prod.Min.DNPM.nº18,p.107. (1937).
- PARENTE, C. V., *et. al.*, **Geologia e Geoquímica dos elementos maiores dos Depósitos de Magnesita Pré-Cambriana (~1.8ga) da Faixa Móvel Orós (Ceará)**. Revista Brasileira de Geociências, 28(4), pgs. 439-448 (1998).
- PATTAN, J. N., PEARCE, N. J. G., **Bottom water oxygenation history in Southeastern Arabian Sea during the past 140 ka: Results from the redox-sensitive elements**. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, v. 280, n. 3-4, p. 396-405, (2009).

- PAZ, J. D. S., ROSSETTI, D. F., **Linking lacustrine cycles with syn-sedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (late Aptian), northeastern Brazil.** Universidade Federal do Pará - Geol. Mag. 142 (3), 2005, pp. 269–285 (2005).
- POWELL, W. G., JOHNSTON, P. A., COLLOM, C. J., **Geochemical evidence for oxygenated bottom Waters during deposition of fossiliferous strata of the Burgess Shale Formation.** V. 201, (2003).
- PLUMMER, F. D., **Geossinclíneo do Parnaíba.** In: Conselho Nacional de Petróleo, Relatório de 1946. Rio de Janeiro. (1946).
- REGAZZI, A. J., **INF 766 – Análise Multivariada.** Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática (2001).
- RIBEIRO, D. S. T., **Estudo de Razões de compostos químicos para análises paleoambientais na Formação Codó, com base em amostras de calha de poços do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba.** Instituto de Geociências - Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra – Universidade Federal Fluminense (2019).
- RODRIGUES, R., **A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba.** 226 p. - Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (1995).
- RODRIGUES, R., **Estudo Sedimentológico e Estratigráfico dos depósitos Silurianos e devonianos na Bacia do Parnaíba.** Belém, Petrobras. Rel. Interno (1967).
- Roy, S., **Mineralogy of the different genetic types of manganese deposits.** *Economic Geology*, 63(7), 760–786. doi:10.2113/gsecongeo.63.7.760 (1968).
- RUSH, R. A., **High resolution geochemical XRF data from Elk Lake, Minnesota: A Holocene paleoclimate record from varved lacustrine sediments.** University of Minnesota (2010).
- SERRA, O., **Fundamentals of Well-log Interpretation V. 1-the Acquisition of Data.** Developments in Petroleum Science A, v. 15 (1984).
- SERRA, O., **Well Logging Data Acquisition And Applications** - Editions Technips (2004).

SERRA, O. et al., **Theory, Interpretation, And Practical Applicatons Of Natural Gamma Ray Spectroscopy**. In: SPWLA 21st Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts (1980).

SILVA, D. R. A., **Aplicação de métodos radiométricos (Rb-Sr e Sm-Nd) na análise de bacias sedimentares – o exemplo da Bacia do Paraná**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil (2006).

SILVA, F. W. F., **DFA e Análise de Agrupamento aplicadas ao Perfil Neutrônico em Poços de Petróleo**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN, Brasil, (2009).

SILVA, T. L. S., **Geocronologia, Geoquímica Isotópica Re-Os e Elemental em folhelhos pirobetuminosos da Formação Ipubi, Bacia do Araripe**. Universidade Federal de Pernambuco, (2017).

SMALL, H. L., **Geologia e suprimento d'água subterrânea no Piauí e parte do Ceará**. Rio de Janeiro, Inspetoria Federal de Obras contra as Secas, Série 1-D, Publ. 32, 146 p.(1914).

SOUZA, A. M., **Monitoração e Ajuste de Realimentação em Processos Produtivos Multivariados**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (2000).

SOUZA, T. A., **ELEMENTOS TERRAS RARAS COMO INDICADORES DO APORTE E PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR NOS ÚLTIMOS 45 MIL ANOS, BACIA DE SANTOS – BRASIL**. Instituto de Química – Pós-Graduação em Geociências – Geoquímica – Universidade Federal Fluminense (2017).

TRIBOVILLARD, N., ALGEO, T. J., LYONS, T., RIBOULLEAU, A., **Trace Metals as pelaoredox and paleoproductivity proxies: Na update**. Chemical Geology 232, 12-32 (2006).

VALDÉS, J., **Evolución de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación em um ambiente marino hipóxico del norte del Chile**. Revista Chilena de Historia Natural, v. 77, n. 1, p. 121-138 (2004).

VAZ, P. T., REZENDE, N. G. A. M., FILHO, J. R. W., TRAVASSOS, W. A. S., **Bacia do Parnaíba, Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p 253-263, maio/novembro (2007).

VERDINELLI, M. A., **Análise Inercial em Ecologia**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (1980).

VETORAZZI, A. L. S., **Caracterização Geológica dos Arenitos da Formação Cabeças (Devoniano) na Borda leste da Bacia do Parnaíba**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro – IGeo (2012).

VICINI, L., **Análise Multivariada da Teoria à Prática**. Universidade Federal de Santa Maria (2005).

Wedepohl, K., **Spurenanalytische Untersuchungen an Tiefseetonen aus dem Atlantik: Geochim. et Cosmochim. Acta**, v. 18, no. 3 (1960).

Websites:

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Disponível em:

http://www.anp.gov.br/doc/dados_estatisticos/Produção_de_Petroleo_bep.

BRUKER CORPORATION. Disponível em:

<https://www.bruker.com/pt/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis.html>