



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA
GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

LUIZA FONSECA RIBEIRO

**INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL E PALEODEPOSICIONAL DA
FORMAÇÃO POTI COM BASE EM *PROXIES* GEOQUÍMICAS, NA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

Niterói,
2021

LUIZA FONSECA RIBEIRO

**INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL E PALEODEPOSICIONAL DA
FORMAÇÃO POTI COM BASE EM *PROXIES* GEOQUÍMICAS, NA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica do Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

ORIENTADOR

PROF. DR. ANTONIO FERNANDO MENEZES FREIRE

COORIENTADOR

PROF. DR. CLEVERSON GUIZAN SILVA

Niterói,

2021

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

R484i Ribeiro, Luiza Fonseca
Interpretação paleoambiental e paleodeposicional da
Formação Poti com base em proxies geoquímicas, na área do
Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. / Luiza Fonseca
Ribeiro ; Antonio Fernando Menezes Freire, orientador ;
Cleverson Guizan Silva, coorientador. Niterói, 2021.
100 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica)-
Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências,
Niterói, 2021.

1. Fluorescência de Raios X. 2. Químioestratigrafia. 3.
Formação Poti. 4. Bacia do Parnaíba. 5. Produção
intelectual. I. Freire, Antonio Fernando Menezes, orientador.
II. Silva, Cleverson Guizan, coorientador. III. Universidade
Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

LUIZA FONSECA RIBEIRO

**INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL E PALEODEPOSICIONAL DA
FORMAÇÃO POTI COM BASE EM *PROXIES* GEOQUÍMICAS, NA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica do Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Aprovado em 05/05/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire (Orientador - GGO/UFF)

Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva (Coorientador - GGO/UFF)

Doutoranda Lidia Waltz Calonio (GGO/UFF)

Doutorando Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares De Oliveira (GGO/UFF)

Dr. Marcos Klotz de Souza (Petrobras)

Niterói,

2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu e me dá forças para seguir o meu caminho, sabedoria para tomar as decisões certas e coragem para enfrentar os meus maiores desafios. Sem a minha fé e sem a certeza de que Deus está no controle, eu não teria chegado até aqui sem desistir.

A minha mãe, minha maior fonte de inspiração, que sempre foi e sempre será meu porto seguro. A ela serei eternamente grata por todo carinho, paciência e suporte emocional nessa reta final da minha graduação.

A todos os meus familiares e amigos, que sempre me incentivaram, apoiaram e vibraram com as minhas conquistas.

Ao meu grande amor, Leonardo, que esteve comigo durante grande parte desta jornada, nos melhores e piores momentos, sempre me acolhendo e me dando forças para continuar.

A todos os professores, servidores e a Universidade Federal Fluminense, por toda a formação de qualidade que recebi em todos esses anos de Geofísica. Agradeço por toda a estrutura, pelas oportunidades e pelo privilégio de fazer parte de uma instituição de tanto prestígio.

Ao melhor orientador que eu poderia ter escolhido, Antonio Fernando Menezes Freire, que desde 2017 vem contribuindo enormemente com a minha formação. Te agradeço, Professor, por ter investido tanto em mim e ter sempre acreditado no meu potencial, até quando eu mesma não acreditava.

A todos os meus colegas do Projeto Parnaíba, em especial Jeniffer, Lidia e Filipe, que com a maior paciência do mundo sempre me ajudaram, me ensinaram e contribuíram tanto com a minha evolução. Não caberiam nos dedos as vezes que me socorreram em tempos de desespero.

As pessoas incríveis que conheci durante esses 5 anos de trajetória acadêmica que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui. Um agradecimento especial ao Paulinho, Ursula, Giulianna, Hugo, Carlos, Moreno, Vivi, Bruno, Fabrício, Russão, Jannuzzinha e Murilo.

A GSS e a todos os membros do capítulo, mais antigos e mais novos, que compartilharam comigo grandes experiências, a paixão pelo trabalho voluntário e o desejo por retribuir tudo de maravilhoso que a Geofísica UFF sempre nos proporcionou.

A Horizonte Soluções Geofísicas, da qual fiz parte no início do curso e me trouxe muito aprendizado. Agradeço a todos os colegas que estiveram comigo durante essa experiência incrível.

Por fim, agradeço a Parnaíba Gás Natural, pela doação das amostras de calha de poços à UFF, contribuindo enormemente com a área de pesquisa e projetos dentro do nosso departamento e cujo material constitui a base deste trabalho, à Agência de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis pela liberação de dados técnicos públicos e à K2 Sistemas pelas licenças acadêmicas do software Trace, utilizado neste trabalho.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.”

- Aristóteles

RESUMO

A Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF) é um dos métodos mais utilizados e bem estabelecidos nos estudos da composição geoquímica de rochas e sedimentos. O presente trabalho traz a utilização desta técnica a fim de analisar a composição química total (*bulk*) de amostras de calha dos poços 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA, coletadas no intervalo da Formação Poti, na área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. A partir da integração de dados geoquímicos e de perfis geofísicos a poço aberto foi possível analisar a variação da composição mineralógica dos arenitos deltaicos da Formação Poti e caracterizá-los como arenitos quartzosos, feldspáticos, piritosos, cimentados, argilosos e/ou enriquecidos em minerais pesados. Uma interpretação paleoambiental e paleodeposicional é proposta neste trabalho com base em *proxies* geoquímicas, tendo a Formação Poti sido dividida em cinco unidades quimioestratigráficas distintas, a partir das razões elementares Si/Al, Si/Fe, K/Ca, Ti/Ca, V/(V+Ni), Y/P, Sr/Cu e Sr/Ca. Também foi realizada uma correlação entre os dois poços, com base nestas quimiofacies e nos perfis de Raios Gama a poço aberto, mostrando ser uma ferramenta eficiente para este fim. É proposto neste estudo um fluxograma de trabalho capaz de interpretar ciclos de maior aporte sedimentar (eventos prográdantes) e ciclos com maior produtividade marinha (eventos retrogradantes), além da identificação de parâmetros geoquímicos que podem ser indicadores de intrusões ígneas, através da relação de *crossovers* entre as curvas Al x K, Fe x Si, K x Fe, Si x Al, Fe x S e Fe x Ti. O presente trabalho traz a utilização de uma metodologia prática, rápida e de baixo custo operacional, capaz de contribuir com estudos estratigráficos, paleoambientais e paleodeposicionais utilizando amostras de calha, sendo uma ferramenta bastante eficaz para o refinamento estratigráfico de zonas de interesse, favorecendo a correlação entre poços e o zoneamento intervalar de reservatórios.

Palavras-chave: Fluorescência de Raios X; Quimioestratigrafia; Fm. Poti; Parque dos Gaviões; Bacia do Parnaíba.

ABSTRACT

X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) is one of the most widely used and well-established methods to infer the geochemical composition of rock and sediments. The present work aims to use this technique in order to analyze the total chemical composition (bulk) of drill cuttings taken from two wells, 3-PGN-5-MA and 1-OGX-110-MA, that correspond to the Poti Formation, in the area of Parque dos Gaviões, Parnaíba Basin. Through the integration of geochemical data and open-hole geophysical logs, it was possible to analyze the variation of the mineralogical composition in the deltaic sandstones of Poti Formation characterizing them as quartz-rich, feldspar-rich, pyrite-bearing, well-cemented, shaly and/or heavy metal-bearing sandstones. Based on the geochemical proxies Si/Al, Si /Fe, K/Ca, Ti/Ca, V/(V+Ni), Y/P, Sr/Cu and Sr/Ca, five different chemostratigraphic units were identified in the Poti Formation and an interpretation about the paleoenvironmental and paleodepositional settings could be made. A correlation was also carried out between the two wells, based on these chemofacies and Gamma Ray logs, so this technique proved to be an efficient tool for this purpose. In this study, a workflow is proposed to infer the sedimentary input (progradation events) and the marine productivity (retrogradation events) cycles, in addition to the identification of geochemical parameters that can be indicators of igneous intrusions, through crossovers between Al x K, Fe x Si, K x Fe, Si x Al, Fe x S and Fe x Ti curves. This project uses a fast, practical and low-cost methodology, that contributes with stratigraphic, paleoenvironmental and paleodepositional studies, using drill cuttings. It demonstrates to be a very effective tool to provide stratigraphic refinement, well-correlation and reservoir zonation.

Keywords: X-Ray Fluorescence; Chemostratigraphy; Poti Fm.; Parque dos Gaviões; Parnaíba Basin.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 XRF.....	17
3.1.1 Radiação Eletromagnética	17
3.1.2 Raios X.....	19
3.1.3 Um Olhar em Nível Atômico.....	19
3.1.4 Radiação Característica e Fluorescência de Raios X.....	21
3.1.5 Análise de XRF.....	22
3.2 Químioestratigrafia.....	24
3.3 Elementos Químicos.....	26
3.4 <i>Proxies</i> Geoquímicas.....	27
4. ÁREA DE ESTUDO	29
4.1 Bacia do Parnaíba.....	29
4.2 Área do Parque dos Gaviões.....	30
4.3 Evolução Tectonoestratigráfica.....	30
4.4 Arcabouço Estratigráfico.....	33
4.4.1 Sequência Siluriana.....	33
4.4.2 Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera.....	33
4.4.3 Sequência Neocarbonífera-Eotriássica.....	36
4.4.4 Sequência Jurássica.....	38
4.4.5 Sequência Cretácea.....	38
4.4.6 Rochas Magmáticas.....	39
4.5 Histórico Exploratório.....	43
4.6 Sistemas Petrolíferos.....	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS	46
5.1 Materiais.....	46
5.1.1 Amostras de Calha.....	47
5.1.2 XRF.....	49

5.2 Métodos.....	50
5.2.1 Pré-Análise.....	51
5.2.1.1 Amostragem.....	51
5.2.1.2 Secagem.....	52
5.2.1.3 Preparação para Análise.....	53
5.2.2 Análise.....	54
5.2.3 Pós-Análise.....	55
5.2.3.1 Exportação e Formatação dos Dados.....	55
5.2.3.2 Análises Estatísticas e de Componentes Principais (PCA).....	56
5.2.3.3 Integração dos Dados.....	57
5.2.3.4 Químioestratigrafia.....	57
5.2.3.5 Correlação entre Poços.....	57
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
6.1 Controle de Qualidade.....	58
6.2 Análise Estatística dos Dados.....	60
6.3 Análise de Componentes Principais (PCA).....	67
6.4 Delimitação e Caracterização do Diabásio.....	72
6.5 Caracterização dos Corpos Arenosos.....	75
6.6 <i>Proxies</i> Geoquímicas.....	80
6.6.1 Argilosidade.....	81
6.6.2 <i>Input</i> Terrígeno.....	81
6.6.3 Condições Redox.....	82
6.6.4 Fonte/Proveniência.....	82
6.6.5 Paleoclima.....	82
6.6.6 Salinidade.....	83
6.7 Interpretação Paleoambiental e Paleodeposicional.....	84
6.8 Correlação Químioestratigráfica dos Poços.....	89
7. CONCLUSÕES.....	92
8. REFERÊNCIAS.....	94

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Propagação da radiação eletromagnética, em função dos campos elétrico (E) e magnético (M). Fonte: Meneses et al. (2012)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2: Espectro de frequências de radiação eletromagnética. Fonte: Encyclopædia Britannica (2021)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Modelo Atômico de Bohr. Fonte: Schlotz & Uhlig (2006)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4: Diagrama de Linus Pauling. Fonte: Benicio (2021)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5: Funcionamento da XRF. Fonte: UNICOMP (2021)</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6: Principais processos que controlam a composição química das rochas sedimentares. Fonte: Melo (2010).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7: Mapa de localização da Bacia do Parnaíba e seus principais limites tectônicos. Fonte: Sumário Geológico, R13, ANP (2015)</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8: Mapa de localização do Parque dos Gaviões e dos 5 campos atualmente em produção. Fonte: Calonio (2020).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9: Seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba mostrando as sequências deposicionais e as distribuições das soleiras nas rochas sedimentares. Fonte: Cioccarì, (2019).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10A: Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba. Fonte: Vaz et al. (2007)</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10B: Continuação da Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba. Fonte: Vaz et al. (2007)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11: Plays da Bacia do Parnaíba na área do Parque dos Gaviões associados aos principais sistemas petrolíferos. Fonte: Calonio (2020)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12: Fotos de caixas contendo amostras de calha doadas à UFF. Fonte: Ribeiro (2019).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13: Mapa de localização dos poços utilizados nas análises.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14: Foto do equipamento XRF de bancada Epsilon 1. Fonte: Malvern Panalytical (2021).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 15: Fluxograma de trabalho adotado.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 16: Fotos exemplificando os processos de amostragem, lavagem, descrição e armazenamento das amostras de calha utilizadas no Projeto Parnaíba, respectivamente. Fonte: Ribeiro (2019)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 17: Etapa de secagem das amostras no liofilizador. Fonte: Ribeiro (2019).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18: Preparação dos recipientes e amostragem para análise no equipamento.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 19: Espectro de XRF após leitura feita no equipamento.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 20: Ambiente de trabalho da etapa de exportação e formatação dos dados. Janela do software Excel.....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 21: Ambiente de trabalho da etapa de exportação e formatação dos dados. Janela do software Trace.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22: Resultados do controle de qualidade das curvas de K, Rb, Ca, Sr, Al e K no poço 3-PGN-5-MA. Os pequenos círculos vermelhos indicam as leituras das duplicatas.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23: Resultados do controle de qualidade das curvas de K, Rb, Ca, Sr, Al e K no poço 1-OGX-110-MA. Os pequenos círculos vermelhos indicam as leituras das duplicatas.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 24: Gráficos de mínimos (MIN), máximos, médias (MED) e desvios-padrão (DP) para os elementos maiores e menores nos poços OGX110 e PGN5.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 25: Gráficos de mínimos (MIN), máximos, médias (MED) e desvios-padrão (DP) para elementos-traço nos poços OGX110 e PGN5.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 26: Gráficos de mínimos (MIN), máximos, médias (MED) e desvios-padrão (DP) para elementos-traço nos poços OGX110 e PGN5.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 27: Resumo gráfico das componentes principais e suas respectivas contribuições no entendimento da variabilidade dos dados nos poços 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 28: Correlação dos Elementos Mg, Ca, Fe, Ti, Al, K, e Si nos poços 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA. Os círculos representam o agrupamento de elementos em rochas areníticas (amarelo), lamosas (verdes) e carbonatos (azuis).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 29: Classificação da Intrusão Ígnea no poço 3-PGN-5-MA em 3 quimiofácies, DB1, DB2 e DB3, de acordo com a variação das curvas geoquímicas.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 30: Séries de Reação de Bowen. Fonte: Teixeira et al. (2000)</i>	<i>74</i>
<i>Figura 31: Classificação dos arenitos da Fm. Poti baseada nas variações dos perfis geoquímicos do poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 32: Classificação dos arenitos da Fm. Poti baseada nas variações dos perfis geoquímicos do poço 1-OGX-110-MA.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 33: Quimiofácies PT-A, PT-B, PT-C, PT-D, PT-E e PT-F da Fm. Poti no poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 34: Quimiofácies PT-A, PT-B, PT-C, PT-D, PT-E e PT-F da Fm. Poti no poço 1-OGX-110-MA.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 35: Correlação da Fm. Poti nos poços 1-OGX-110-MA e 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>90</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Camadas eletrônicas, níveis e subníveis de energia e seus respectivos preenchimentos eletrônicos. Fonte: Benicio (2021).....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2: Resumo de Proxies Geoquímicas – Revisão Bibliográfica.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 3: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para todos os elementos maiores e menores analisados no poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 4: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para todos os elementos-traço analisados no poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos maiores e menores da porção Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos-traço da porção Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 7: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos maiores e menores analisados no poço 1-OGX-110-MA.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 8: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos-traços analisados no poço 1-OGX-110-MA.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 9: Análise de PCA realizada nas amostras do poço 3-PGN-5-MA.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 10: Análise de PCA realizada nas amostras do poço 1-OGX-110-MA.....</i>	<i>68</i>

1. INTRODUÇÃO

Através de investigações geológicas busca-se compreender a distribuição, principais características, relações, origem e formação de rochas e recursos minerais presentes em uma área de interesse. Investigações geológicas podem ser de dois tipos, diretas e indiretas, e ambos são aplicáveis na verificação da superfície e subsuperfície terrestre (Assis, 2018).

Na exploração de óleo e gás, a perfuração de poços e a utilização de métodos geofísicos de investigação indireta é de extrema importância para o entendimento geológico e para a avaliação do potencial econômico de uma região. Através desses métodos é possível obter uma gama de informações em subsuperfície, identificando assim zonas de interesse exploratório, minimizando-se riscos nas etapas de exploração e contribuindo para a otimização da produção.

A quimioestratigrafia envolve a identificação de características geoquímicas, baseadas na variação espaço-temporal dos elementos químicos nas rochas ou na variação das razões entre esses elementos (Ramkumar, 2015 *apud* Prundeanu, 2021), podendo ser usada como um método independente ou em conjunto com outras informações, como dados de litologia, de perfis geofísicos, de petrologia ou até mesmo registros bioestratigráficos (Prundeanu, 2021).

Um método bastante utilizado para análise química de amostras de rocha e sedimentos é o de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF), uma técnica robusta, que combina boa precisão e exatidão, baixo custo operacional e preparação de amostras bastante simples e rápida (Malvern Panalytical, 2021). No presente estudo, a análise de XRF foi implementada em amostras de calha da Formação Poti em dois poços, 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA, ambos provenientes da região do Parque dos Gaviões, na Bacia do Parnaíba. Apesar de ainda pouco estudada, a Bacia do Parnaíba vem se destacando no cenário brasileiro e vem acumulando sucessos exploratórios nas últimas décadas, demonstrando grande potencial para exploração de gás no país (Calonio, 2020).

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo foi elaborar um fluxograma de trabalho para utilizar *proxies* geoquímicas, a fim de realizar inferências sobre as características paleoambientais e paleodeposicionais dos arenitos e folhelhos deltaicos da Fm. Poti, utilizando análises de XRF em amostras de calha de dois poços da Área do Parque dos Gaviões, na Bacia do Parnaíba.

Buscou-se fazer uma descrição detalhada da metodologia analítica aplicada, dos resultados obtidos das análises, do tratamento estatístico empregado e da confecção de perfis geoquímicos para ambos os poços, tentando associar ao perfil de Raios Gama (GR) corrido a poço aberto. Com base nesses dados, pretendeu-se fazer uma discussão a respeito da composição química/mineralógica dos arenitos deltaicos da Formação Poti, bem como utilizar *proxies* geoquímicas para a divisão dos reservatórios em diferentes fácies quimioestratigráficas, tecendo inferências sobre as condições vigentes durante os processos deposicionais e diagenéticos deste intervalo estratigráfico.

O presente trabalho visou a criação de uma metodologia capaz de contribuir com estudos estratigráficos e possibilitar um maior entendimento dos reservatórios da Fm. Poti, na área do Parque dos Gaviões, na Bacia do Parnaíba, mas também poderá ser aplicada a outros poços da bacia, podendo ser testada em outros ambientes deposicionais. Com a aplicação desta metodologia, espera-se refinar zoneamentos estratigráficos em alta resolução, conferindo maior robustez as interpretações e otimizando os processos exploratórios e de desenvolvimento da produção.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo se propôs a gerar conhecimento através da integração de dados geoquímicos, geológicos e geofísicos. Esta integração de dados, utilizando amostras de calha, é bastante inédita, conferindo a este trabalho grande diferencial científico.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 XRF

3.1.1 Radiação Eletromagnética

Na física clássica, a radiação eletromagnética é caracterizada pelo fluxo de energia através do vácuo ou de algum meio material na forma de ondas eletromagnéticas. Em tais ondas, os campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo estão mutuamente conectados uns aos outros perpendiculares entre si e à direção do movimento (figura 1). Existem vários tipos de radiação eletromagnética, e estes estão relacionados a diferentes frequências e comprimentos de onda (Fritzsche & Phillips, 2020).

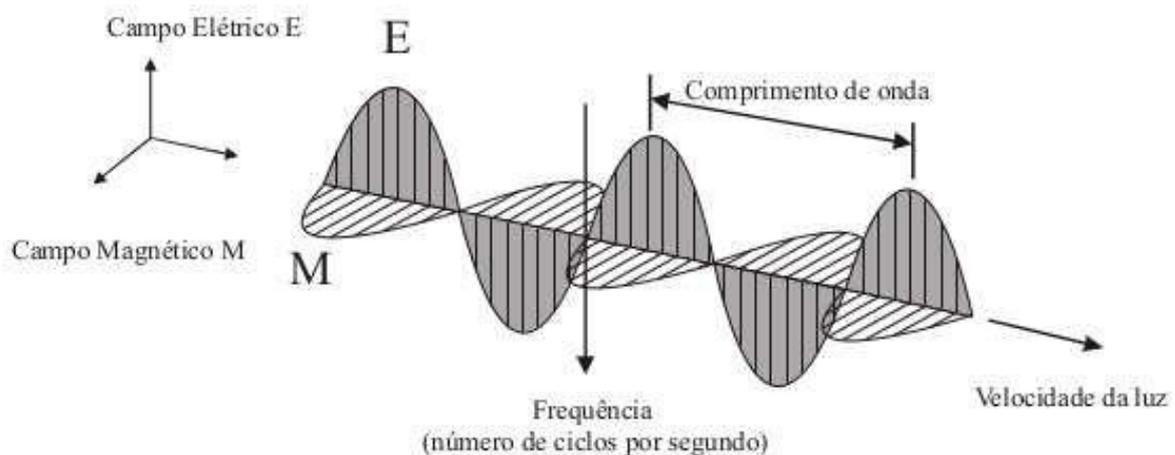


Figura 1: Propagação da radiação eletromagnética, em função dos campos elétrico (E) e magnético (M). Fonte: Meneses *et al.* (2012)

O espectro de frequências de radiação eletromagnética (figura 2) é bastante amplo e varia desde valores de frequência bem baixos, como no caso das ondas de rádio e televisão, passando pela frequência da luz visível e chegando a valores mais altos como nos da luz ultravioleta, raios x e raios gama (Fritzsche & Phillips, 2020).

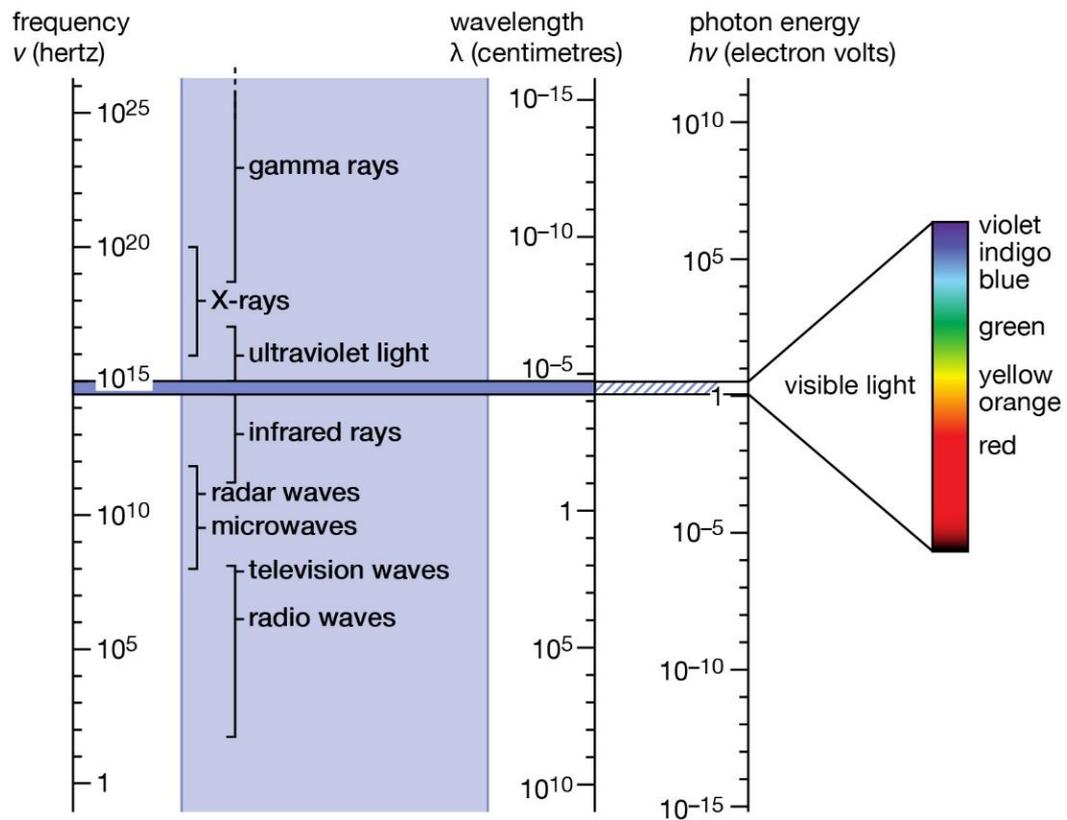


Figura 2: Espectro de frequências de radiação eletromagnética. Fonte: Encyclopædia Britannica (2021)

Em termos de física quântica, a radiação eletromagnética pode ser compreendida como o fluxo de fótons através do espaço. Fótons são pequenos pacotes de energia 'hv' que se movimentam na velocidade da luz, onde h representa a constante de Planck e ν a frequência da onda eletromagnética da teoria clássica (equação 1). Os fótons que apresentam a mesma quantidade de energia $h\nu$ são semelhantes e sua densidade corresponde à intensidade da radiação (Fritzsche & Phillips, 2020).

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{Equação 1})$$

E = energia; h = constante de Planck = 6.62517×10^{-27} erg·s, ν = frequência
 c = velocidade da luz = 2.99793×10^{10} cm/s; λ = comprimento de onda

3.1.2 Raios X

Os fótons de raios X apresentam energias na faixa de cerca de 100 eV (elétron-volt) a mais de 100 KeV (quilo elétron-volt) e são produzidos quando elétrons de alta velocidade desaceleram ou quando ocorrem transições eletrônicas envolvendo os estados de energia da órbita interna dos átomos (Schlotz & Uhlig, 2006). Para uma melhor compreensão da origem desses raios, é importante se atentar ao funcionamento desse processo a nível atômico.

3.1.3 Um Olhar em Nível Atômico

A estrutura de um átomo (figura 3) é definida como a combinação de um núcleo composto por prótons e neutrons (cargas positivas) e uma eletrosfera formada por elétrons (cargas negativas) que se movimentam em órbitas circulares ao redor desse núcleo (Schlotz & Uhlig, 2006).

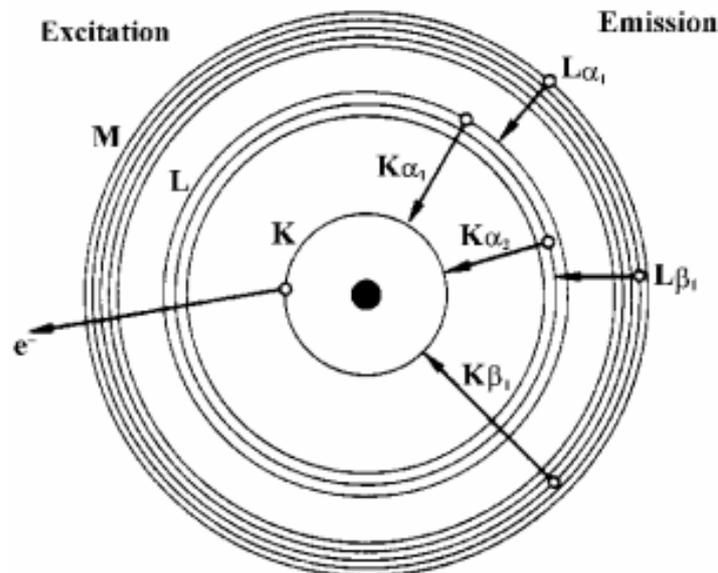


Figura 3: Modelo Atômico de Bohr. Fonte: Schlotz & Uhlig (2006)

Os elétrons estão dispostos em diferentes camadas ou níveis, representadas por letras (K, L, M, N,...). A camada K é a camada mais interna e é ocupada por dois 2 elétrons, já a camada L, é composta por dois subníveis e pode conter até 8 elétrons (Schlotz & Uhlig, 2006). O modelo de distribuição eletrônica é bem representado pelo Diagrama de Linus Pauling (figura 4), no qual os subníveis energéticos são denominados pelas letras s, p, d e f, cada um com sua energia específica. Um resumo das diferentes camadas eletrônicas, níveis e subníveis de energia e seus respectivos preenchimentos eletrônicos pode ser visualizado na tabela 1.

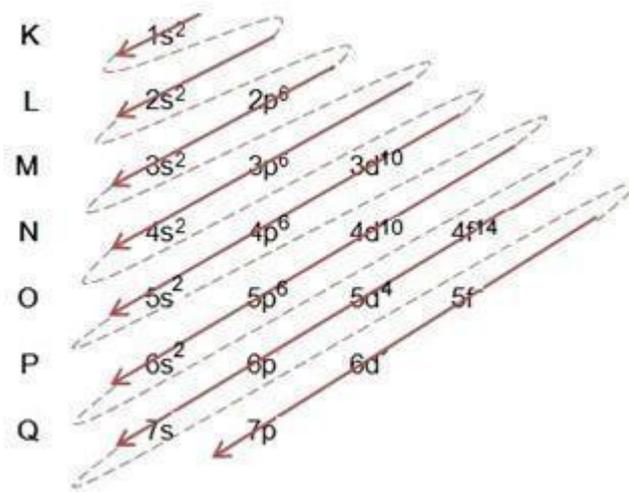


Figura 4: Diagrama de Linus Pauling. Fonte: Benicio (2021).

Tabela 1: Camadas eletrônicas, níveis e subníveis de energia e seus respectivos preenchimentos eletrônicos. Fonte: Benicio (2021)

CAMADA	QUANTIDADE DE ELÉTRONS	NÍVEL	SUBNÍVEL	PREENCHIMENTO ELETRÔNICO
K	2	1	s	1s ²
L	8	2	s, p	2s ² , 2p ⁶
M	18	3	s, p, d	3s ² , 3p ⁶ , 3d ¹⁰
N	32	4	s, p, d, f	4s ² , 4p ⁶ , 4d ¹⁰ , 4f ¹⁴
O	32	5	s, p, d, f	5s ² , 5p ⁶ , 5d ¹⁰ , 5f ¹⁴
P	18	6	s, p, d	6s ² , 6p ⁶ , 6d ¹⁰
Q	8	7	s, p	7s ² , 7p ⁶

A força de ligação dos elétrons com o núcleo depende do nível que ocupam, níveis estes que variam em energia. Quanto mais distante está o elétron do núcleo, menor a força de atração e menor é a energia necessária para remover esse elétron da camada. A quantidade mínima de energia necessária para liberar um elétron do átomo é denominada energia de ligação e muitas vezes é encontrada na literatura relacionada ao limite de absorção (Schlotz & Uhlig, 2006).

3.1.4 Radiação Característica e Fluorescência de Raios-X (XRF)

Cada elemento é definido por seu número atômico Z na tabela periódica ou pelo número de elétrons em estado neutro. As energias de ligação ou os níveis de energia em cada elemento são diferentes e característicos, resultado do número variável de elétrons (cargas negativas) ou o número Z das cargas positivas no núcleo atômico (= número atômico) (Schlotz & Uhlig, 2006).

Se um elétron de uma camada mais interna é retirado do átomo pela irradiação de energia, outro elétron, de uma camada superior, é deslocado para preencher o espaço deixado e nesse processo ocorre a liberação de uma quantidade de energia, que é equivalente a diferença entre os níveis de energia envolvidos (Schlotz & Uhlig, 2006).

Em se tratando de nomenclatura, denomina-se radiação K a radiação liberada ao reabastecer a camada K, radiação L quando se reabastece a camada L e assim sucessivamente. Além disso, a informação da origem do elétron deslocado é representada por letras gregas (α , β , γ ,...) diferenciando assim entre vários níveis e subníveis (Schlotz & Uhlig, 2006).

A energia que está sendo liberada pode ser emitida na forma de um raio-X ou transferida para um elétron de outra camada atômica (efeito Auger). A probabilidade de um raio-X resultante deste processo é chamada de rendimento quântico de fluorescência ω . Isso depende do número atômico do elemento e da camada em que a "vacância" ocorreu. ω é muito baixo para elementos leves (aprox. 10^{-4} para boro) e quase atinge um valor de 1 para o Camada K ou para elementos mais pesados, por exemplo o urânio (Schlotz & Uhlig, 2006).

No entanto, uma vez que a energia ou comprimento de onda do raio X é muito característico para o elemento do qual ele é emitido; essa radiação é chamada de raios X característicos. Isso fornece a base para a determinação de elementos químicos com o auxílio da análise de fluorescência de raios-X (Schlotz & Uhlig, 2006).

3.1.5 Análise de XRF

O objetivo principal da análise de Fluorescência de Raios X é determinar elementos químicos de forma qualitativa e quantitativa, medindo sua radiação característica. Para isso, os elementos químicos em uma amostra devem ser obrigados a emitir raios X. Como os raios X característicos surgem apenas na transição dos elétrons da camada atômica para níveis de energia mais baixos e vazios do átomo, deve ser aplicado um método adequado para liberar elétrons da camada atômica mais interna. Isso envolve adicionar aos elétrons internos quantidades de energia superiores à energia que os liga ao átomo. Uma das maneiras de fazer isso é por irradiação usando raios X de um tubo de raios X (Schlotz & Uhlig, 2006).

De forma simplificada, a análise de XRF é realizada usando um espectrômetro de raios X cujo conceito básico é uma fonte de radiação, uma amostra e um sistema de detecção (figura 5). Os sistemas de espectrômetros são geralmente divididos em dois grupos principais: sistemas de dispersão de comprimento de onda (WDXRF) e sistemas de energia dispersiva (EDXRF). A diferença entre os dois está no sistema de detecção (Malvern Panalytical, 2021).

Em espectrômetros EDXRF, a ampola de raios X que atua como fonte, irradia uma amostra diretamente, e a fluorescência proveniente da amostra é medida com um detector de energia dispersiva. Esse detector é capaz de medir as energias diferentes da radiação característica que vem diretamente da amostra. O detector pode separar a radiação da amostra na radiação de diferentes elementos presentes na amostra e essa separação é chamada de dispersão (Malvern Panalytical, 2021).

A partir dessa técnica, é possível então detectar a composição química presente em diferentes tipos de amostras e as concentrações de cada elemento de acordo com as intensidades lidas pelo equipamento.

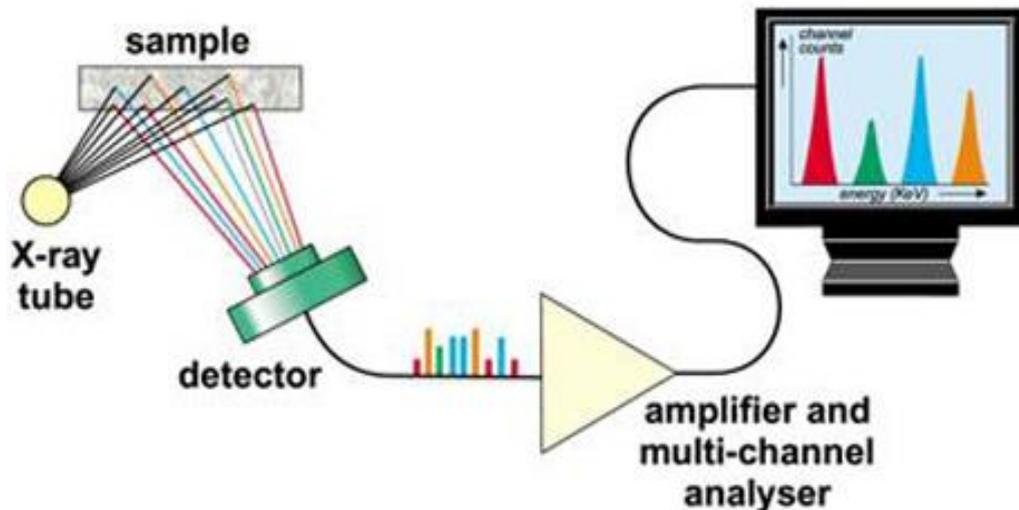


Figura 5: Funcionamento da XRF. Fonte: UNICOMP (2021)

A Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (XRF) é um dos métodos mais utilizados e bem estabelecidos nos estudos da composição geoquímica de rochas, sedimentos e amostras geológicas (Kramar, 1997; Ling *et al.*, 2017; Tosolana-Delgado & McKingley, 2016; Weltje & Tjallingii, 2008; Young, Evans, Hodges, Bleacher, & Graff, 2016 *apud* Oyedotun, 2018). Por muitos anos, a espectrometria de XRF é usada na determinação de concentrações geoquímicas para uma variedade de elementos maiores e menores e elementos-traços (em nível de partes por milhão (ppm))(Oyedotun, 2018).

As vantagens do uso da Fluorescência de Raios X são muitas, sendo uma técnica de fácil aplicação, rápida e não destrutiva. Os equipamentos costumam ser de pequeno porte e necessitam de pouca manutenção. Além disso, as análises dependem bem pouco de insumos laboratoriais e não utilizam água, ar comprimido ou gases (Malvern Panalytical, 2021). Dessa forma, a técnica de XRF apresenta ótimo custo-benefício, representando uma poderosa ferramenta tanto na área de pesquisa quanto na área de exploração.

3.2 Químioestratigrafia

A estratigrafia química (químioestratigrafia) é uma técnica que utiliza dados da geoquímica orgânica e inorgânica para caracterizar e correlacionar estratos sedimentares (WEISSERT *et al.*, 2008). Esta ferramenta tem como base a identificação de assinaturas geoquímicas diagnósticas, que caracterizem determinados horizontes ao longo de um perfil vertical em poços ou afloramentos. Intervalos que apresentam padrões similares são definidos como fácies ou unidades químioestratigráficas e, desta forma, unidades de um determinado poço poderão ser correlacionadas com unidades de outros poços em alta resolução e, frequentemente, sobre amplas áreas (Melo, 2010).

A caracterização de sedimentos e rochas sedimentares significa a investigação dos teores de elementos químicos (maiores, menores e traços) ou relações isotópicas, buscando compreender como os eventos geológicos e ambientais atuaram para conduzir ao enriquecimento ou a diminuição de determinados elementos ou isótopos (Melo, 2010). Desta forma, na correlação o dado geoquímico é utilizado como um marcador, o qual pode ser “rastreado” em horizontes adjacentes por amplas áreas, pois determinadas variações geoquímicas anômalas são resultadas de eventos globais ou locais, que ocorreram em determinada fração do tempo geológico e por isso é considerado um marco cronoestratigráfico (Oliveira, 2006, *apud* Melo, 2010).

A composição química das rochas sedimentares é controlada pelo tipo de rocha fonte, características e intensidade do intemperismo físico e químico (que conduzirá a eliminação de determinados minerais e conseqüentemente enriquecimento de outros), tipo de transporte (agente de seleção), deposição onde pode haver influência de processos biogênicos, químicos (evaporação) e diagênese que é o processo de alteração da rocha após sua sedimentação (Melo, 2010). Os principais processos que controlam a composição química das rochas sedimentares estão representados na figura 6.

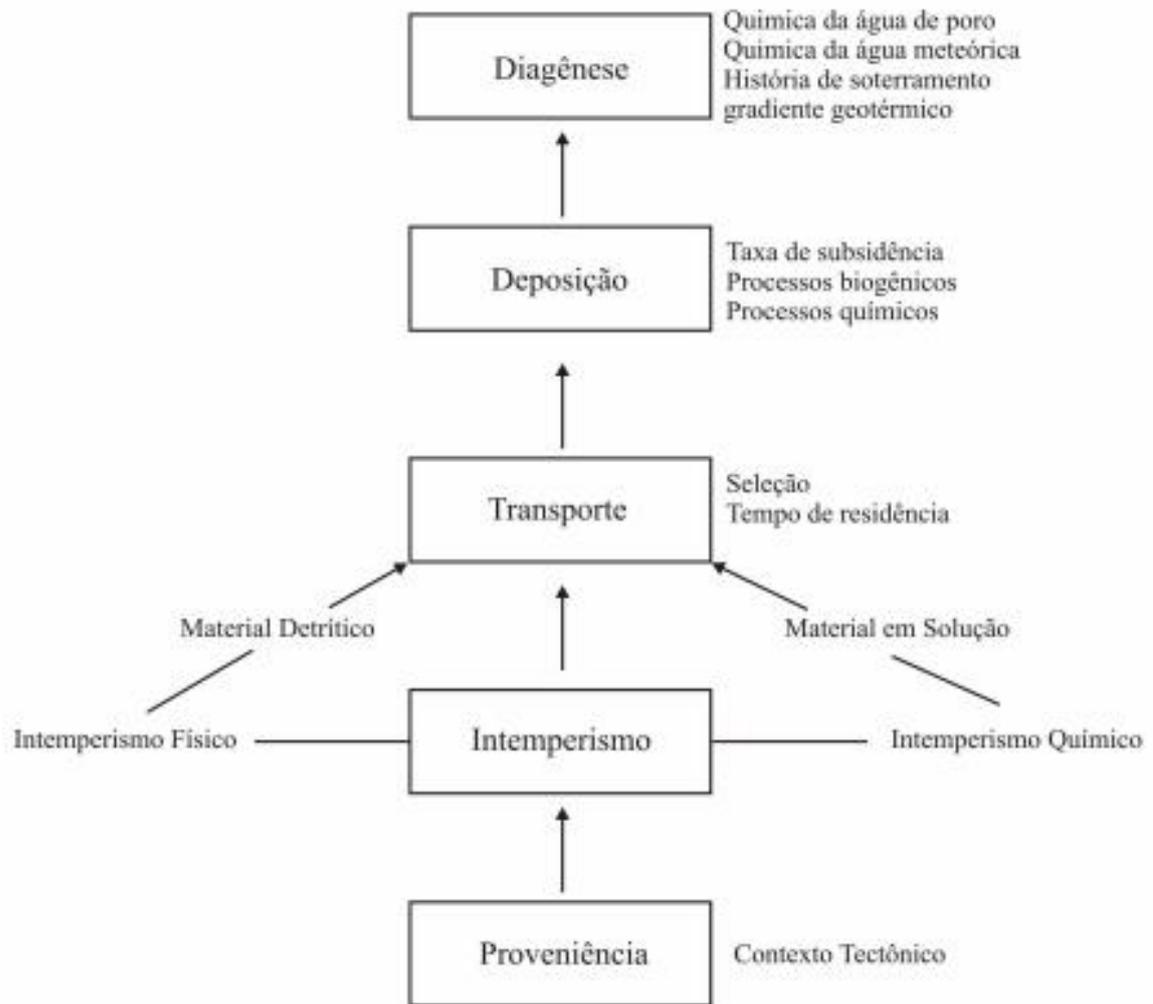


Figura 6: Principais processos que controlam a composição química das rochas sedimentares. Fonte: Melo (2010).

3.3 Elementos Químicos

Os elementos podem ser classificados comumente como litófilos, organófilos, calcófilos e siderófilos de acordo com as fases as quais estão ligados (Melo, 2010).

Na associação litófila as fases principais são a carbonática, argilosa, feldspática e sulfatos traduzindo uma relação entre os elementos e a litologia propriamente dita (Melo, 2010). Na fase carbonática os principais elementos são o Ca, Mg, Sr e Mn. Já na fase argilosa, os grupos de elementos estão condicionados aos tipos de argilominerais: illita (B, V, Ba – Ba, Sr – Al, Ti, Ba, Sr – Al, Ti, Ga, Sr), caolinita (Al, Ti, Ga – Al, Ti, Sr), clorita (Mg, Zn, Ni – Fe, Co, Mn, Ni – V, Zn, Ga, Ni, Co – Al, Ga, Co, Mn) e esmectita (Cr (V, Ni, Co) – Ga, Ni, Co – B, Ca, Sr) (Melo, 2010).

O alumínio é um elemento importante que pode auxiliar na determinação de fontes detríticas clásticas (Rodrigues, 2005, *apud* Melo, 2010) e apresenta alta correlação com os elementos Ti, Mg, Na, K, Ga, La e Nb. Os elementos Ba, Ti, Ga e Pb estão bastante ligados a feldspatos potássicos, Ti, Ba, Sr e Ca com feldspatos sódicos e Ti, Ca, Ba e Sr com feldspatos cálcicos (Melo, 2010).

Na associação organófila as principais associações são carbono orgânico e Mo, Ni e Cu e carbono orgânico e Mo, Ni, Cu, V, Cr e Zn. No ambiente em que a matéria orgânica é bem preservada, com aumento da anoxia a tendência é que ocorra enriquecimento sucessivo de Ni, Cu, Mo e V (Melo, 2010).

A associação calcófila corresponde aos elementos relacionados aos sulfetos. A maioria dos elementos que se associam a fase sulfeto também pode ser encontrada na associação organófila. O único elemento que pode estar presente na associação calcófila, mas não pode estar presente na associação organófila é o Co. Desta forma, quando há associação entre o Co e a matéria orgânica é porque também existe uma fase de sulfetos ligada à matéria orgânica (Melo, 2010).

As associações Pb – Co – Fe ou Pb – Zn – Co – Fe são frequentemente indicadoras da fase pirita (Teixeira & Rodrigues, 1997, *apud* Melo, 2010). Entre estes elementos o Fe parece exercer um papel fundamental na formação da pirita, uma vez que é a disponibilidade dos íons ferroso e férrico (ao lado dos íons de enxofre) o principal fator controlador da formação deste mineral em ambientes marinhos com baixa oxigenação (Rodrigues, 2005, *apud* Melo, 2010).

Na associação siderófila (elementos ligados ao ferro) os elementos mais comuns são Fe, Mn, Cr, V, Mo, Ni, Co e Pb. São comuns as seguintes associações: Mn, V, Cr ou Mo – Mn – Co ou Mo - Ni – Co – Mn. O par V-Cr é praticamente indissolúvel, devido a semelhança de seus raios iônicos. Ni – Co é também um par muito comum, exceto quando o Ni está associado à matéria orgânica onde o Co não é comum. Mn – Co é bastante frequente na fase óxido, pela proximidade de seus raios iônicos (Teixeira & Rodrigues, 1997 *apud* Melo, 2010).

O Ba é geralmente reportado na bibliografia como sendo indicador de produtividade primária e sedimentação biogênica. De acordo com Rodrigues (2005), *apud* Melo (2010), há situações em que o Ba pode ter alta correlação estatística com o Al o que sugere uma fonte do influxo de terrígenos de fora da bacia principalmente através de minerais de argila.

3.4 Proxies Geoquímicas

As *proxies* geoquímicas são observações indiretas que podem ser feitas através de razões e relações elementares em registros sedimentares e constituem uma importante ferramenta quando se trata de reconstrução paleoambiental e paleodeposicional.

A tabela 2 traz um resumo com diversas *proxies* encontradas durante a etapa de revisão teórica deste projeto, com suas respectivas interpretações e referências. Algumas *proxies* foram utilizadas neste trabalho e serão aprofundadas mais adiante no capítulo Resultados e Discussões, já as demais ficam como contribuição científica, servindo como base para estudos futuros relacionados à quimioestratigrafia e à interpretação paleoambiental e paleodeposicional.

Proxies	Referência	Interpretação	Proxies	Referência	Interpretação
Si/Al	Craigie, 2015; Bailey, 2017	Quartzo x Argila/Maturidade do Sedimento	Ni/Co e V/(V+Ni)	Rimmer, 2004 <i>apud</i> Han, 2020	Ambiente Paleoredox
Ti/Ca e Fe/Ca	Arz <i>et al.</i> , 1999; Nace <i>et al.</i> , 2014 <i>apud</i> Gebregiorgis, 2020	Input Terrígeno	K/Al	Madukwe, 2019	Feldspato Alcalino X Plagioclásio e Argilo-Minerais
Fe/Al e S	Van Capellen <i>et al.</i> , 1998 <i>apud</i> Lopez, 2006	Transição de Zonas/Eventos Óxidos para Anóxicos	Sr/Cu	Lerman, 1989; Wang <i>et al.</i> , 1997 <i>apud</i> Sarki Yandoka, 2015	Paleoclima
Zr/Nb	Ratcliffe & Wright, 2012	Granulometria	Ga/Rb	Xie, 2018, Cao, 2012 <i>apud</i> Han, 2020	Paleoclima
Zr/Rb e Ca	Gebregiorgis, 2020	Granulometria	Rb/Sr	Silva, 2017 <i>apud</i> Ribeiro, 2019	Paleoclima
K/Ti e K/Rb	Clift <i>et al.</i> , 2008, <i>apud</i> Gebregiorgis, 2020	Intemperismo	Sr/Ca	Bahr, 2008 <i>apud</i> Ribeiro, 2019	Salinidade
Ti/Al	Tian <i>et al.</i> , 2011 <i>apud</i> Gebregiorgis, 2020	Intemperismo e Erosão	Sr/Ba	Deng & Qian, 1993 <i>apud</i> Sarki Yandoka, 2015	Salinidade
P-org, Ni/Al, (Ni + Cu) /Al	Eagle <i>et al.</i> , 2003; Tribovillard <i>et al.</i> , 2006	Paleoprodutividade	V/Ni	Jiao, 2010	Migração de Hidrocarboneto
Zr/P e Y/P	Craigie, 2016	Fonte / Proveniência	Fe/Mg	Sano <i>et al.</i> , 2014	Piritização
Si/Al e Si/K	Lopez, 2006	Energia de Transporte	Fe/Ti, (Fe+Mn)/Ti e Al/(Al+Fe+Mn)	Adachi <i>et al.</i> , 1986; He <i>et al.</i> , 2016	Sedimentação Hidrotermal e Biogênica
Ca/Al e Ca/Mg	Lopez, 2006	Mineralização da Água/Condutividade	(Ni+V+Fe) /Al	Gezeeri, 2009	Densidade de Fratura
U/Th, Ni/Co, V/Cr e V/(V+Ni)	Tribovillard <i>et al.</i> , 2006; Algeo e Tribovillard, 2009	Condições Redox	Ba/Al	Dean <i>et al.</i> 1997; <i>apud</i> Li, 2017	Paeoprodutividade
Cu/Zn, (Cu + Mo)/Zn, V/Sc	Vários autores <i>apud</i> Madukwe, 2019	Condições Redox	S/Cl	Croudace, 2015 <i>apud</i> Ribeiro, 2019	Sedimentação Marinha

Tabela 2: Resumo de *Proxies* Geoquímicas – Revisão Bibliográfica. Fonte: do autor.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba, conhecida também como Bacia do Maranhão ou Piauí-Maranhão, é uma extensa bacia intracratônica, de idade paleozoica, localizada na região nordeste brasileira (Figura 7), englobando parte dos estados do Piauí, Tocantins, Maranhão, Pará, Ceará e Bahia (Vaz *et al.*, 2007). A bacia de formato elíptico, ocupa uma área de mais de 600.000 Km², tendo o seu maior eixo em direção NE-SW com cerca de 1.000 km de comprimento e o seu depocentro atingindo uma espessura de 3.500m (Vaz *et al.*, 2007). Limita-se a Noroeste com a Bacia de Marajó, separada desta pelo Arco de Tocantins, a Norte com as Bacias de São Luís e Barreirinhas, separada destas pelo Arco Ferrer-Urbano Santos e a Sudeste, pelo Arco do São Francisco (Vetorazzi, 2012 *apud* Calonio).

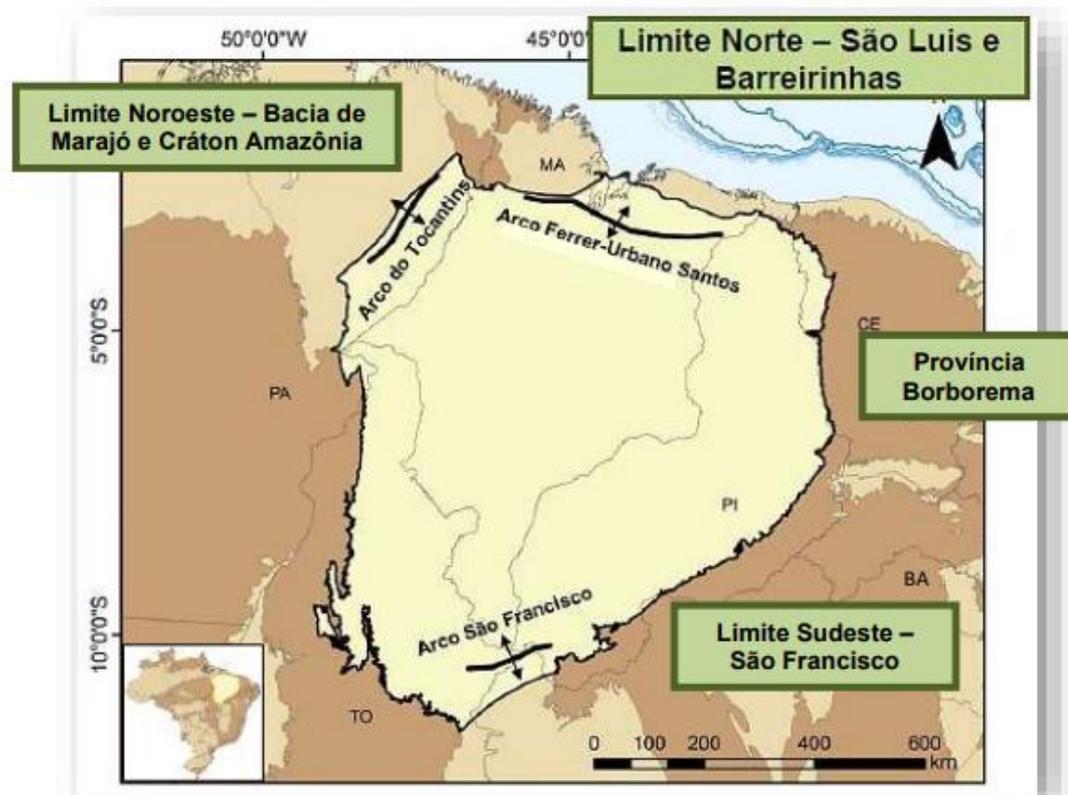


Figura 7: Mapa de localização da Bacia do Parnaíba e seus principais limites tectônicos. Fonte: Sumário Geológico, R13, ANP (2015)

4.2 Área do Parque dos Gaviões

A Área do Parque dos Gaviões (figura 8) é a região no centro norte da bacia onde estão localizados os nove campos declarados comerciais até o momento, cinco deles em produção (Gavião Real, Gavião Vermelho, Gavião Branco, Gavião Caboclo e Gavião Azul) e quatro em desenvolvimento (Gavião Preto, Gavião Branco Norte, Gavião Tesoura e Gavião Carijó) (Calonio, 2020).

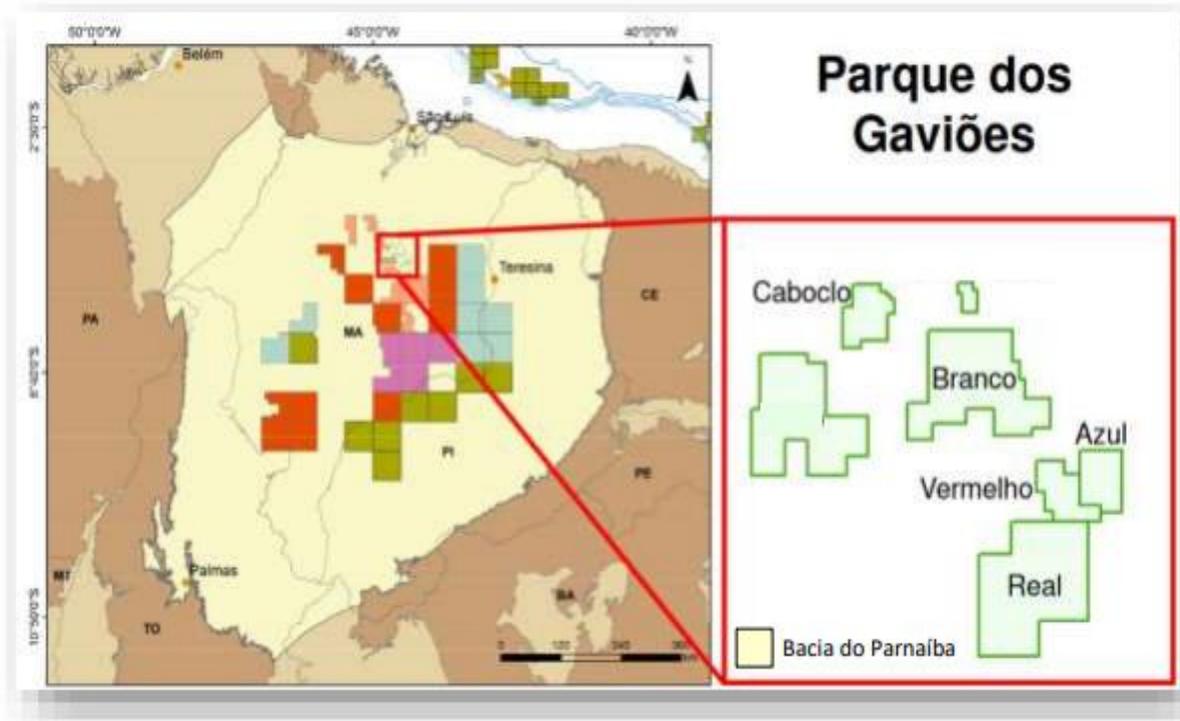


Figura 8: Mapa de localização do Parque dos Gaviões e dos 5 campos atualmente em produção.

Fonte: Calonio (2020)

4.3 Evolução Tectonoestratigráfica

A Bacia do Parnaíba foi desenvolvida durante a estabilização da Plataforma Sul-Americana, estando assim relacionada a deformações, pulsos terminais e eventos térmicos do final do Ciclo Brasileiro, além de eventos pós orogênicos durante o amalgamento do Gondwana, que geraram estruturas grabeniformes que controlaram o depocentro inicial (Vetorazzi, 2012, *apud* Calonio, 2020).

Segundo (Vaz *et al.*, 2007), o substrato dessa bacia é constituído de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, cujas idades abrangem um longo intervalo de tempo, indo desde o Arqueano até o Ordoviciano, e possivelmente são predominantes rochas formadas entre o final do Proterozoico e o início do Paleozoico, o que corresponde ao tempo de consolidação dessa plataforma.

O embasamento é constituído pela junção dos crátons São Luís-Oeste Africano, Amazônico, Maranhão e São Francisco e pelas faixas de dobramento Tocantins-Araguaia, Borborema, Gurupi e Rio Preto, estabilizadas na passagem Proterozoico Superior/Paleozoico Inferior, possuindo os limites erosivos que refletem as reativações tectônicas das estruturas do seu substrato (Góes 1995, *apud* Calonio, 2020).

O registro sedimentar também teve contribuição da subsidência causada por estiramento litosférico, sobrecarga representada pela inserção de sedimentos e outros processos da dinâmica continental. Portanto, as ascensões eustáticas respondem, em parte, pelas sucessivas inundações do mar no Brasil durante o Fanerozoico. Sendo assim, a eustasia foi o fator primordial no controle dos ciclos transgressivos-regressivos e, conseqüentemente, das discordâncias que definem os limites das sequências da Bacia do Parnaíba (Almeida & Carneiro, 2004, *apud* Nobre, 2019).

Dois grandes lineamentos que cortam o embasamento e constituem estruturas bastante importantes no contexto de evolução tectonoestratigráfica da bacia são os lineamentos Transbrasiliano e Pico Santa Inês (Ferraz, 2015, *apud* Calonio, 2020), sendo o Transbrasiliano o mais proeminente das feições morfoestruturais, atravessando toda a porção nordeste e sul-sudeste (Vaz *et al.*, 2007).

As fraturas e falhas herdadas do embasamento foram importantes não somente na fase inicial da bacia, mas também em sua evolução, pois controlaram as direções dos eixos deposicionais até o Eocarbonífero e, posteriormente, do Neocarbonífero até o Jurássico, os depocentros deslocaram-se para a parte central da bacia, a sedimentação passou a ter um padrão concêntrico e a forma externa da bacia tornou-se ovalada, típica de uma sinéclise interior (Ferraz, 2015, Vaz *et al.*, 2007 *apud* Calonio, 2020).

O Lineamento Transbrasiliano (LTB) é um sistema *strike-slip* situado entre o Cráton Amazônico e a porção leste da Plataforma Sul-Americana, sendo composto por vários segmentos de falhas transcorrentes, com alguns setores levemente curvilíneos (Praxedes, 2015, *apud* Nobre, 2019). O LTB foi definido como uma faixa cataclasada com cerca de 2700 km de extensão que cruza o Brasil passando desde o Ceará até o Mato Grosso do Sul, chegando ao Paraguai e Argentina (Schobbenhaus *et al.*, 1975, *apud* Nobre, 2019). Segundo alguns autores, representa reativação de mega-sutura que atuou na formação do supercontinente Gondwana, entre o final do Proterozoico e início do Paleozoico (Marini *et al.*, 1984; Cordani & Sato, 1999; Cordani *et al.*, 2000, Almeida *et al.*, 2000; Brito Neves & Fuck, 2013, 2014, *apud* Nobre, 2019).

O Lineamento Pico-Santa Inês é uma faixa cataclasada disposta no sentido NW-SE disposta transversalmente em relação ao lineamento Transbrasiliano, apresentando 160 km de extensão e 200 a 300 m de rejeito. Esta faixa reflete na morfologia contemporânea uma série de alinhamentos orientados para NW (Vetorazzi, 2012, *apud* Nobre, 2019).

Uma seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba mostrando as seqüências deposicionais e as distribuições das soleiras nas rochas sedimentares e a zona de falha transbrasiliana pode ser observada na figura 9.

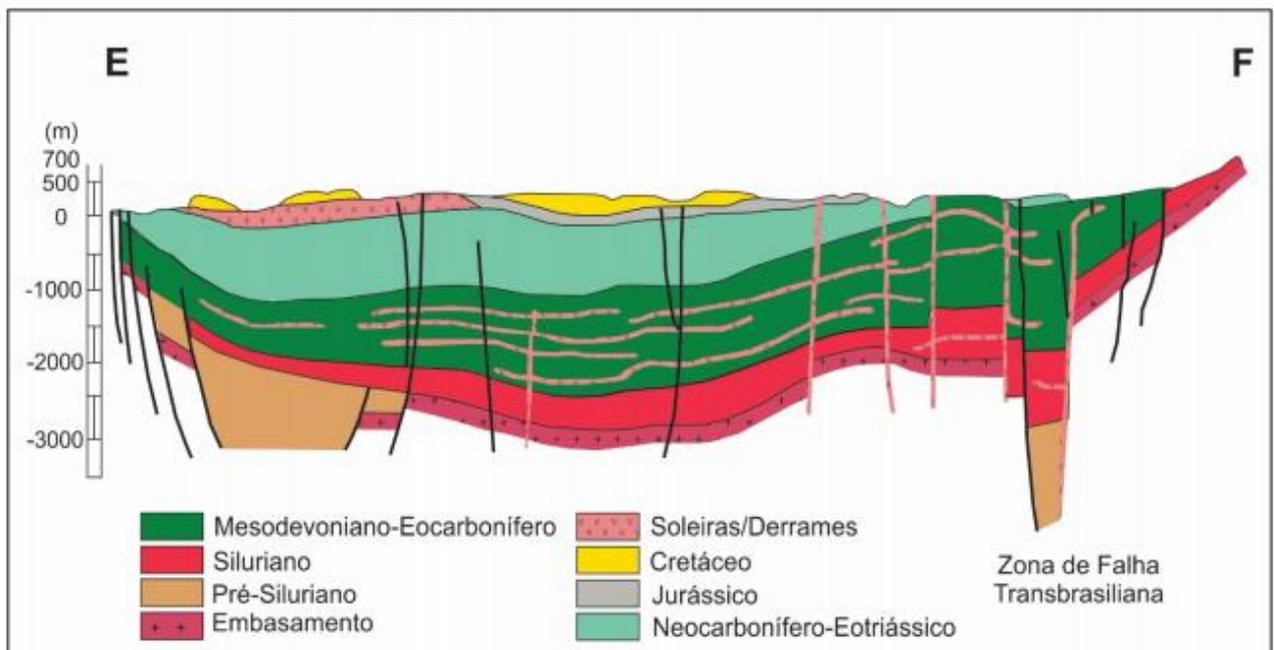


Figura 9: Seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba mostrando as seqüências deposicionais e as distribuições das soleiras nas rochas sedimentares Fonte: Cioccarri, (2019)

4.4 Arcabouço Estratigráfico

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Parnaíba pode ser dividido em cinco seqüências deposicionais, Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica, Cretácea (Vaz *et al.*, 2007), como ilustrado na carta estratigráfica nas figuras 10A e 10B ao final desta seção.

4.4.1 Sequência Siluriana

A Sequência Siluriana está associada a um ciclo transgressivo-regressivo e corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Serra Grande (Small 1914, *apud* Nobre, 2019) que teve como proposta a sua subdivisão em três formações (Ipu, Tianguá e Jaicós) (Caputo, 1984).

A **Formação Ipu**, mais antiga, caracteriza-se por arenitos seixosos, conglomerados com matriz areno-argilosa contendo matacões de quartzo ou quartzito e arenitos finos a grossos, tendo as rochas dessa unidade sido depositadas em diferentes tipos de ambientes, de glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicas (Caputo, 1984).

A **Formação Tianguá**, que representa a superfície de inundação máxima, é constituída de folhelhos cinza escuro bioturbados, sideríticos e carbonáticos; de arenitos cinza claros, fino a médio, feldspáticos; de intercalações de siltitos e folhelhos cinza escuros, bioturbados e micáceos, depositados num ambiente de plataforma rasa (Góes & Feijó, 1994).

Já a **Formação Jaicós**, consiste em arenitos cinza com tonalidades claras, grossos, com seixos angulares a subangulares, mal selecionados, friáveis, maciços, com estratificação cruzada lenticular (Caputo, 1984), depositados por sistemas fluviais entrelaçados (Góes & Feijó, 1994).

4.4.2 Sequência Mesodevoniana – Eocarbonífera

A seqüência Mesodevoniana-Eocarbonífera representa a transição marinho-continental e é composta pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti, que definem litoestratigraficamente o Grupo Canindé (Góes & Feijó, 1994).

A **Formação Itaim** é caracterizada pela presença de arenitos finos a médios com grãos subarredondados, bem selecionados e com alta esfericidade. Na base dessa unidade se observa um maior número de intercalações de folhelhos

bioturbados. Além disso, nota-se uma granocrescência ascendente (Della Fávera, 1990). De acordo com Góes & Feijó (1994), os sedimentos foram depositados em ambientes deltaicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e de tempestades.

A **Formação Pimenteiras** consiste em folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados, radioativos e ricos em matéria orgânica, ocorrendo também intercalações de siltitos e arenitos com níveis piritosos (Lima & Leite, 1978). Em subsuperfície Caputo (1984) descreveu folhelhos pretos, cinza-escuros e esverdeados, micáceos e geralmente sideríticos, folhelhos siltosos e camadas de silito, podendo ocorrer também delgadas camadas de arenito fino, às vezes com fragmentos de folhelhos. Vaz *et al.* (2007) atribuiu a esta unidade o ambiente de plataforma rasa dominada por tempestade.

A **Formação Cabeças** é composta por arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, com intercalações delgadas de siltitos e folhelhos. Diamictitos ocorrem eventualmente e com maior frequência na parte superior. Tilitos, pavimentos e seixos estriados denotam um ambiente glacial ou periglacial (Caputo, 1984). Estratificação cruzada tabular ou sigmoidal predomina, e tempestitos ocorrem na transição para a Formação Pimenteiras (Della Fávera, 1990). Um ambiente plataformal sob a influência preponderante de correntes desencadeadas por processos de marés é defendido por Góes & Feijó (1994) como o mais importante nessa unidade. Fácies flúvio-estuarinas também ocorrem.

A **Formação Longá** contém folhelhos cinza-escuros a pretos, em parte arroxeados, homogêneos ou bem laminados, bioturbados. Em sua porção média comumente apresentam um pacote de arenitos e siltitos cinza-claros a esbranquiçados, laminados (Lima & Leite, 1978). Um ambiente plataformal dominado por tempestades foi interpretado por Góes e Feijó (1994) para essas rochas.

A **Formação Poti**, foco deste trabalho, é composta por arenitos finos claros com estratificações cruzadas tabulares e sigmoidais, siltitos e escassos conglomerados e diamictitos (Paiva & Miranda, 1937, *apud* Góes, 1995), além de delgadas camadas de carvão (Della Fávera, 1990). Apresenta espessura máxima de 300m (Caputo, 1984; Cunha, 1986; Góes, 1995). Mesner e Wooldridge (1964), *apud* Lobato (2007), subdividiram a formação em duas unidades (membros), inferior e superior, compostas respectivamente por arenitos e conglomerados com raras

intercalações de folhelhos e por arenitos com intercalações de folhelhos e restos vegetais, incluindo finos leitos de carvão.

Outros trabalhos também adotaram essa subdivisão, como os de Cruz *et al.* (1973), Leite *et al.* (1975), Lima & Leite (1978) e Góes (1995), *apud* Lobato (2007). Caputo (1984) subdivide a Formação Poti em quatro unidades informais. A unidade inferior representa paleoambientes de ante praia (*shoreface*) e frente deltaica, sucedida por planícies aluviais periglaciais. A segunda unidade, composta por sucessões de folhelhos e siltitos, pode representar paleolagos isolados. A terceira unidade, composta por arenitos e diamictitos, é interpretada como depósitos de planície de *outwash*. A quarta unidade, superior, composta por siltitos e diamictitos, pode representar paleoambientes lacustres e glaciais. Góes (1995) interpreta a base da Formação Poti e o topo da Formação Longá como pertencentes a uma única sequência deposicional, relacionada a um paleoambiente deltaico/estuarino, plataformal, litorâneo e fluvial em um sistema regressivo de costa progradante.

Os trabalhos de Cruz *et al.* (1973) e Leite *et al.* (1975), *apud* Lobato (2007), em análise de 34 poços testemunhados da Formação Poti, apontam como principal área-fonte a borda sul, com diminuição granulométrica para norte, tendência evidenciada também no trabalho de Lima & Leite (1978). O limite inferior com a Formação Longá é considerado concordante (Lima & Leite, 1978), com brusca mudança litológica, ocorrendo localmente de forma gradacional (região de Campo Maior e Batalha) no estado do Piauí ou ainda com discordâncias locais (regiões próximas a Itaueiras, Várzea Grande e Cristino Castro) também no estado do Piauí.

Caputo (1984) considera discordâncias basais nas faixas de afloramento, onde a porção superior da Formação Longá, subjacente, pode ter sido erodida. O limite superior, com a Formação Piauí, dá-se por discordância regional, que inclusive limita as sequências devoniana e permocarbonífera de Góes & Feijó (1994).

O conteúdo fossilífero restringe-se a espécies de esporomorfos (microfósseis), uma macroflora de pequeno porte, bivalvíos e pequenos peixes. A paleomicroflora aponta uma vegetação herbácea e arbustiva, conforme descrito e revisado por Iannuzzi (1994), *apud* Lobato (2007). Santos & Carvalho (2004), *apud* Lobato (2007) relacionam a flora da Formação Poti a uma associação entre os reinos Gondwânico e Euro-Americano (Tetiano).

A fauna encontrada restringe-se à porção inferior da unidade e é compreendida por bivalvíos e peixes. Segundo Santos & Carvalho (2004), *apud* Lobato (2007), representam um paleoecossistema com duas paleocomunidades: uma bentônica, de plataforma marinha rasa, séssil, que formaria depósitos de conchas grossas remobilizadas por tempestades; e outra florística, em ambiente terrestre litorâneo, com acumulações in situ de formas higrófilas, tipicamente colonizadoras de margens lacustres ou estuarinas, relacionadas a ambientes parálicos de ilhas-barreira.

A idade da Formação Poti é considerada “Carbonífero Médio a Inferior”, com base em palinórfos, posicionando-se nos intervalos bioestratigráficos IX e X de Lima & Leite (1978). Melo & Loboziak (2000) *apud* Lobato (2007) atribuem idade do Viséano Médio à base (biozona TC) até pelo menos o Viséano Superior (biozona ME) para a Formação Poti, sugerindo uma discordância com a Formação Longá, devido à ausência das biozonas TS, PU e CM (Viséano Inferior e Tournaisiano Superior) entre as duas formações. Paleogeograficamente, durante o Tournaisiano e o Viséano, configurava-se um mar interno que interligava as bacias do Parnaíba, Amazonas, o Cráton Oeste Africano e o paleo-oceano Tetis (Della Fávera, 1990).

A sedimentação segue um condicionamento ao longo do eixo NW-SE do lineamento Picos-Santa Inês. Góes (1995) identificou no topo da Formação Poti evidências de controles tectônicos, com canais fluviais bruscamente recobertos por depósitos de maré, em rápido afogamento do sistema, precedendo a grande discordância erosiva entre o Mississipiano e o Pensilvaniano, identificada na bacia desde os trabalhos de Mesner e Wooldridge (1964). Cruz *et al.* (1973) reconhecem blocos soerguidos na borda sul da bacia, relacionados por Castelo Branco & Coimbra (1984) ao arqueamento do Alto do Parnaíba, enquanto Góes & Feijó (1994) atribuem a efeitos da Orogenia Eoherciniana.

4.4.3 Sequência Neocarbonífera- Eotriássica

A Sequência Neocarbonífera- Eotriássica corresponde ao Grupo Balsas, composto pelas formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba.

Lima & Leite (1978) dividiram a **Formação Piauí** em duas sucessões: a inferior, composta de arenitos cor-de-rosa, médios, maciços ou com estratificação cruzada de grande porte e intercalações de folhelho vermelho, e a superior, formada

de arenitos vermelhos, amarelos, finos a médios, contendo intercalações de folhelhos vermelhos, calcários e finas camadas de sílex. Siltitos e lentes conglomeráticas também ocorrem (Caputo, 1984). Segundo Melo *et al.* (1998) essa unidade é Pensilvaniana (não mais antiga que o Moscoviano). Lima & Leite (1978) interpretaram um ambiente fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, num clima semi-árido a desértico.

A **Formação Pedra de Fogo**, de idade permiana (Dino *et al.* 2002), é caracterizada por uma considerável variedade de rochas - sílex, calcário oolítico e pisolítico creme a branco, eventualmente estromatolítico, intercalado com arenito fino a médio amarelado, folhelho cinzento, siltito, anidrita e, eventualmente, dolomito. Depositados num ambiente marinho raso a litorâneo com planícies de sabkha, sob ocasional influência de tempestades (Góes & Feijó, 1994). Ciclos deposicionais podem ser identificados na sucessão de camadas desta unidade (Aguiar, 1971). Os contatos são concordantes com as Formações Piauí (subjacente) e Motuca (sobrejacente).

A **Formação Motuca** denomina siltito vermelho e marrom, arenito branco fino e médio, subordinadamente folhelho, anidrita e raros calcários. Esses dois últimos litotipos, segundo Lima & Leite (1978), ocorrem sob a forma de lentes delgadas nos pelitos, e o contato apresenta-se concordante com a Formação Pedra de Fogo (subjacente). De acordo com Góes & Feijó (1994), os sedimentos Motuca foram depositados num sistema desértico, com lagos associados. Sua idade (Caputo, 1984) estende-se do Permiano terminal ao início do Eotriássico. Contudo, considerando-se a datação da Formação Pedra de Fogo (Dino *et al.* 2002), a sedimentação Motuca talvez tenha se prolongado até o final do Eotriássico.

A **Formação Sambaíba** é composta, conforme disposto por Vaz *et al.* (2007), de arenitos vermelhos a cor-de-rosa, creme-claro/esbranquiçado, em geral finos a médios, subangulosos a subarredondados. As dunas com estratificação cruzada de grande porte, contendo diversas feições típicas de sedimentos eólicos caracterizam rochas de um sistema desértico com contribuição fluvial e incursões marinhas (ciclotemas evaporíticos). Em algumas áreas, na porção superior notam-se disjunções colunares prismáticas, devido à influência térmica do capeamento basáltico (Lima & Leite, 1978).

4.4.4 Sequência Jurássica

A Sequência Jurássica é definida por Vaz *et al.* (2007) somente pela **Formação Pastos Bons** cujos litotipos podem ser divididos em três partes: na base predomina arenito branco ou com tonalidades esverdeadas, amareladas, fino a médio, grãos subarredondados e, geralmente, apresentam estratificação paralela e raras lentes de calcário. Na parte média da seção ocorrem siltito, folhelho/argilito cinza a verdes, comumente intercalados com arenito. A porção mais superior é formada de arenito vermelho/cor-de-rosa, fino, gradando para siltito, contendo níveis de folhelho (Caputo, 1984).

4.4.5 Sequência Cretácea

A Sequência Cretácea, última a ser depositada, é constituída pelas seguintes Formações: Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru.

A **Formação Corda** refere-se, essencialmente, a arenitos vermelhos, castanhoavermelhados, muito finos/finos e médios, seleção regular a boa, semifriáveis a semicoesos, ricos em óxidos de ferro e zeólitas. Quando ocorrem sobrepostos a basaltos, é abundante a presença de fragmentos dessa rocha como arcabouço. Estratificações cruzadas de grande porte, climbings transladantes e ripples, fluxos de grãos e outras estruturas típicas de dunas eólicas são comuns nessa unidade. Estruturas cruzadas de baixo ângulo e cruzadas acanaladas também ocorrem. Desse conjunto de informações deduz-se que essa unidade foi depositada em um sistema desértico (Vaz *et al.*, 2007).

A **Formação Grajaú** apresenta arenitos creme-claro/esbranquiçado, cremeamarelado 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. Estruturas cruzadas acanaladas e marcas de carga são abundantes. Eventualmente encontram-se clastos de basaltos em arenitos (Vaz *et al.*, 2007).

A **Formação Codó** é composta por folhelhos, calcários, siltitos, gipsita/anidrita e arenito e são frequentes níveis de sílex e estromatólito (Vaz *et al.*, 2007). O mesmo autor, em afloramentos observados, descreve jazimentos de gipsita recobertos abruptamente por folhelho bege a cinza/preto esverdeado, revelando uma ampla inundação (transgressão) do mar/lago Codó. Rossetti *et al.* (2001) declaram

que as Formações Grajaú e Codó, ambas do Neopaleozóico-Eoalbio, foram depositadas em ambientes marinho raso, lacustre e flúvio-deltaico. Interdigitação ou equivalência cronoestratigráfica entre essas duas Formações é asseverada também por Lima & Leite (1978). Mendes (2007) interpreta que a Formação Codó 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.

A **Formação Itapecuru** (Campbell, 1949, *apud* Góes & Feijó, 1994) (Mesoalbio-Neocretáceo) é formada por arenitos variegados, finos, friáveis, com estruturas diversas, como, por exemplo, estratificações cruzadas swaley, hummocky, acanalada, tabular, mud couplets e escorregamento de massa. Pelitos e arenitos conglomeráticos ocorrem, mas subordinadamente (Anaisse Junior *et al.* 2001, *apud* Vaz *et al.* 2007). Seus depósitos correspondem a seis ciclos deposicionais transgressivos, atribuídos a sistemas de vales estuarinos incisos um sistema estuarino-lagunar episodicamente atingido por ondas de grande escala, no qual foram observados os seguintes ambientes: canal fluvial, laguna, canal de maré e litorâneo (Rossetti *et al.* 2001, *apud* Vaz *et al.* 2007).

4.4.6 Rochas Magmáticas

Segundo Vaz *et al.* (2007), na Bacia do Parnaíba acomodaram-se as ígneas intrusivas (diques e soleiras) e extrusivas de idade mesozoica, as quais, do ponto de vista estratigráfico, foram divididas em duas unidades: Formação Mosquito (Eojurássico) e Formação Sardinha (Cretáceo inferior).

Formação Mosquito foi o termo proposto por Aguiar (1971) para identificar derrames basálticos com intercalações de arenitos. Já para a Formação Sardinha, denominou corpos de basalto, preto a roxo. De acordo com Caputo *et al.*, (2005), a duração da atividade magmática persistiu muito mais do que nas outras bacias paleozoicas brasileiras. Em subsuperfície, os diques e soleiras estão presentes em maior quantidade na Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera e ocorrem também na Sequência Siluriana e são muito raros na Neocarbonífera-Eotriássica (Vaz *et al.*, 2007).

Segundo Miranda *et. al.* (2018) a idade das rochas magmáticas foi estabelecida usando Métodos de datação K-Ar e Ar-Ar. Os resultados levaram a dois grupos de idades. O grupo mais antigo, relacionado à abertura do Oceano Atlântico Equatorial, corresponde a Formação Mosquito com idades que variam de 215 a 150 Ma. Geralmente ocorre na forma de grandes derrames de basalto e grandes soleiras, abundantes na parte ocidental da bacia. Este evento magmático pode ser correlacionado ao magmatismo Penatecaua, nas bacias do Solimões e Amazonas, e ao magmatismo Anari/Tapirapuã, na Bacia dos Parecis (Almeida, 1986; Milani & Thomaz Filho, 2000; Bahia *et al.*, 2006, *apud* Calonio, 2020), estando relacionada à quebra do Pangea no Jurássico-Triássico que estabeleceu no Brasil um novo estágio tectônico, o da ativação, que levaria à eventos distensionais, reativação de falhas antigas, surgimento de fraturas e intenso magmatismo (Almeida & Carneiro, 2004; Zalán, 2004, *apud* Calonio, 2020).

O evento magmático Sardinha, mais recente, com idade variando de 149,5 a 87 Ma, é correlacionado à abertura do Atlântico Sul e à Formação Serra Geral na Bacia do Paraná (Fodor *et al.*, 1990; Bellieni *et al.*, 1990, *apud* Calonio, 2020), estando ligado, aparentemente, à quebra de Gondwana no Eocretáceo. Estas intrusões mais jovens são representadas por grandes diques e pequenas soleiras, mais abundantes nas porções a leste da bacia.

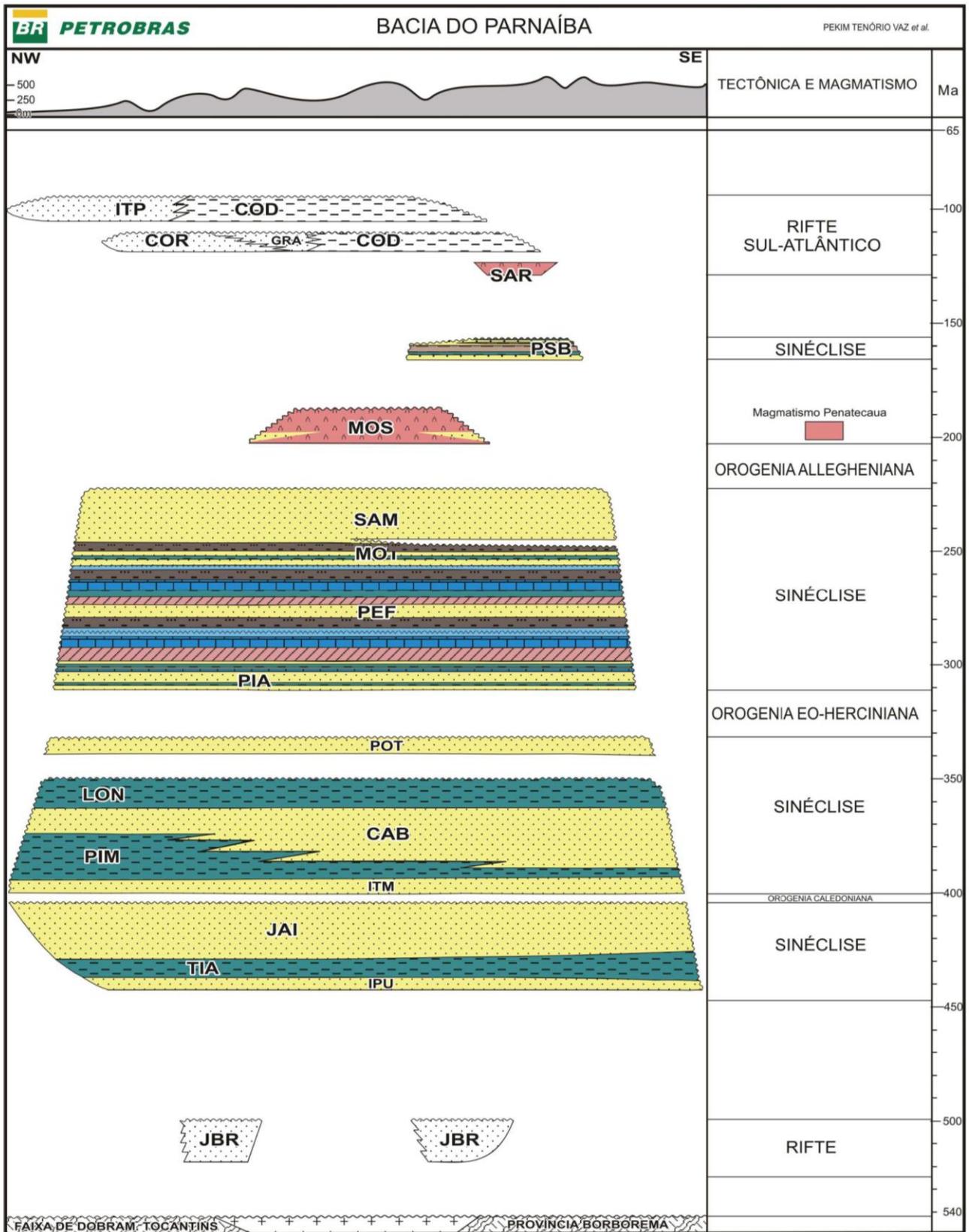


Figura 10B: Continuação da Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba. Fonte: Vaz et al. (2007)

4.5 Histórico Exploratório

Os esforços voltados para a exploração de óleo e gás na bacia do Parnaíba tiveram início na década de 50 com a atuação do antigo Conselho Brasileiro de Petróleo (CNP). Nessa primeira fase exploratória, foram conduzidos diversos levantamentos geológicos de superfície na região e dois poços foram perfurados (Araújo, 2017).

Com a criação da Petrobrás, em 1953, foi dado início a uma segunda campanha exploratória, que contou com trabalhos de mapeamento geológico, levantamentos gravimétricos, aquisição sísmica 2D e perfuração de 27 poços com ocorrência de óleo e gás (Miranda *et al.*, 2018).

A terceira fase de esforços exploratórios, durante o período de 1975 a 1988, teve a reflexão sísmica como principal ferramenta na identificação de novos prospectos, quando 7 outros poços foram perfurados (Araújo, 2017).

De 1988 a 1993, dados sísmicos foram reprocessados, dados aeromagnéticos adquiridos e levantamentos geoquímicos realizados. Durante esses primeiros 4 estágios exploratórios um total de 34 poços foram perfurados, 13.200 km lineares de sísmica 2D foram adquiridos, junto com 163.690 km² de dados magnetométricos e 116.360 km² de dados gravimétricos. Infelizmente, devido à complexidade dos sistemas petrolíferos atípicos e ausência de rodadas de licitações não foram reportadas descobertas significativas na bacia, sendo deixada de lado por um longo período de tempo (Miranda *et al.*, 2018).

Pouco depois da nona rodada de licitações da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) no ano de 2008, operadoras brasileiras do setor privado iniciaram a quinta e mais bem-sucedida campanha de exploração na bacia. No decorrer desta última fase, cerca de 14.000 km de sísmica 2D e 480 km² de sísmica 3D foram adquiridos e mais de 100 poços perfurados, resultando na descoberta de 27 Bcm (bilhões de metros cúbicos) de gás recuperável em sete campos comerciais. A produção de gás de 8,4 Mm³/dia (milhões de metros cúbico/dia) vem de cinco campos produtores que alimentam o Complexo do Parnaíba, englobando uma unidade de tratamento de gás e instalações de usina termelétrica. Os 1,4 GW (gigawatt) gerados no complexo suprem uma quantidade significativa de energia nas regiões norte e nordeste do país (Miranda *et al.*, 2018).

Diante de todos esses sucessos exploratórios, a Bacia do Parnaíba é, atualmente a segunda maior produtora terrestre de gás natural no Brasil e responde por aproximadamente 10% da produção nacional (Calonio, 2020).

4.6 Sistemas Petrolíferos

Ao contrário dos sistemas petrolíferos convencionais onde o calor envolvido na maturação do querogênio está relacionado ao grau de subsidência e ao nível soterramento da bacia, a maturação da matéria orgânica na Bacia do Parnaíba se deu pelo incremento térmico das intrusões magmáticas tardias, o que torna o sistema petrolífero da bacia um sistema não convencional. De acordo com Rodrigues (1995), além do incremento térmico fornecido para a geração, as rochas intrusivas funcionam como trapas e selos, bem como podem ter favorecido a estruturação da bacia para a migração do gás (Calonio, 2020).

O sistema petrolífero descreve a relação genética entre a rocha geradora matura e as acumulações em reservatório relacionadas, podendo ser classificada quanto ao nível de certeza em conhecido (!), hipotético (.) e especulativo (?). Os sistemas petrolíferos atípicos na Bacia do Parnaíba que se destacam são Tianguá-Ipu (?), Tianguá-Jaicós (?), Pimenteiras-Jaicós (?), Pimenteiras-Cabeças (!), Pimenteiras-Poti (!), Pimenteiras-Pimenteiras (?) e Longá-Poti (?) (Cioccarri, 2019).

Os principais geradores da bacia são os folhelhos das formações Tianguá, Pimenteiras e Longá. Os folhelhos da Formação Pimenteiras (Devoniano) constituem a principal rocha geradora da bacia, pois além da alta radioatividade apresentam espessuras superiores a 500 m (Góes *et al.*, 1990; Kingstone & Matzko, 1995, *apud* Cioccarri, 2019). O querogênio são dos tipos II e III e os valores de COT variam entre 0,4% e 4,8% com potencial gerador inferior a 1,0 kg HC/t rocha e baixo índice de hidrogênio, variando entre 6 e 50 mg HC/g COT (Góes *et al.*, 1990; Amaral *et al.*, 2013, Miranda, 2014, *apud* Cioccarri, 2019).

Já os potenciais reservatórios da Bacia do Parnaíba são os arenitos das formações Ipu, Jaicós, Cabeças, Pimenteiras, Piauí e Poti (Cioccarri, 2019).

Descobertas de gás pela empresa Óleo e Gás Participações S.A. (OGX) identificaram os sistemas petrolíferos Pimenteiras-Poti (!) no campo de Gavião Real e Pimenteiras-Cabeças (!) no campo de Gavião Azul, ambos no Estado do Maranhão (ANP, 2016 *apud* Cioccarri, 2019). Na figura 11 são ilustrados exemplos de plays

associados aos principais sistemas petrolíferos na área do Parque dos Gaviões, na Bacia do Parnaíba.

Os arenitos reservatórios da Formação Poti têm espessuras entre 40 m e 140 m (Góes, 1995) e porosidade variando entre 6% e 21% (ANP, 2017 *apud* Ciocari, 2019). Os reservatórios da Formação Cabeças são arenitos com cerca de 400 m de espessura e o gás no campo de Gavião Azul (sistema petrolífero Pimenteiras-Cabeças (!)) foi efetivamente gerado na Formação Pimenteiras pela maturação associada ao efeito térmico de soleiras (Young & Borghi, 2003; Cunha *et al.*, 2012, ANP, 2016, *apud* Ciocari, 2019).

Outros possíveis sistemas petrolíferos secundários da Bacia do Parnaíba são Pimenteiras-Piauí (!), Pimenteiras-Pedra de Fogo (.), Pimenteiras-Pimenteiras (.), Pimenteiras-Itaim (.), Tianguá-Ipu (?) (Calonio, 2020).



Figura 11: *Plays* da Bacia do Parnaíba na área do Parque dos Gaviões associados aos principais sistemas petrolíferos. Fonte: Calonio (2020)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

O presente trabalho faz parte do Projeto Parnaíba e possui como objeto de estudo amostras de calha doadas à Universidade Federal Fluminense (figura 12) pela Parnaíba Gás Natural para fins acadêmicos. Estas amostras estão sendo utilizadas atualmente em diversos trabalhos dentro do projeto.



Figura 12: Fotos de caixas contendo amostras de calha doadas à UFF. Fonte: Ribeiro (2019)

5.1.1 Amostras de Calha

As amostras de calha são fragmentos de formações rochosas perfuradas em poços e trazidos à superfície através do fluido de perfuração. Tais fragmentos são coletados à medida que a broca avança no poço e constituem amostras, não pontuais, mas representativas do conteúdo de cada intervalo perfurado. A análise desses fragmentos permite o reconhecimento dos conteúdos litológico e fossilífero presentes no poço além de informações a respeito do potencial gerador e de indícios da existência de hidrocarbonetos. As amostras de calha após a coleta, são lavadas e peneiradas a fim de se separar fragmentos mais grosseiros, relacionados ao material desabado no poço, além de se remover o fluido de perfuração das amostras. Por último, as amostras de calha são armazenadas em sacos de pano e identificadas com o nome do poço e de acordo com a profundidade nelas representada.

Para este estudo, foram utilizadas amostras de calha referentes a Formação Poti em dois poços, 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA, ambos localizados na região do Parque dos Gaviões na Bacia do Parnaíba (figura 13). Foram analisadas 130 amostras do poço 3-PGN-5-MA no intervalo 1122/1530m e 90 amostras do poço 1-OGX-110-MA, no intervalo 1323/1590m, totalizando 220 amostras.

No poço 3-PGN-5-MA, o intervalo analisado engloba a parte superior da Formação Poti (1122/1175m), a soleira de diabásio (1175/1332m) e o reservatório Poti 2 (1332/1530m), com amostras de 3 em 3 metros e uma lacuna no intervalo 1362/1377m, devido a retirada de um testemunho nessa área, com a consequente ausência de amostras de calha. Infelizmente não foi possível obter acesso físico a esse testemunho, o que permitiria uma amostragem em altíssima resolução. Já no poço 1-OGX-110-MA, o intervalo analisado compreende toda a porção do reservatório Poti 2 (1322/1580m) e a transição Poti-Longá 1580/1590m), também com taxa de amostragem de 3 em 3 metros.

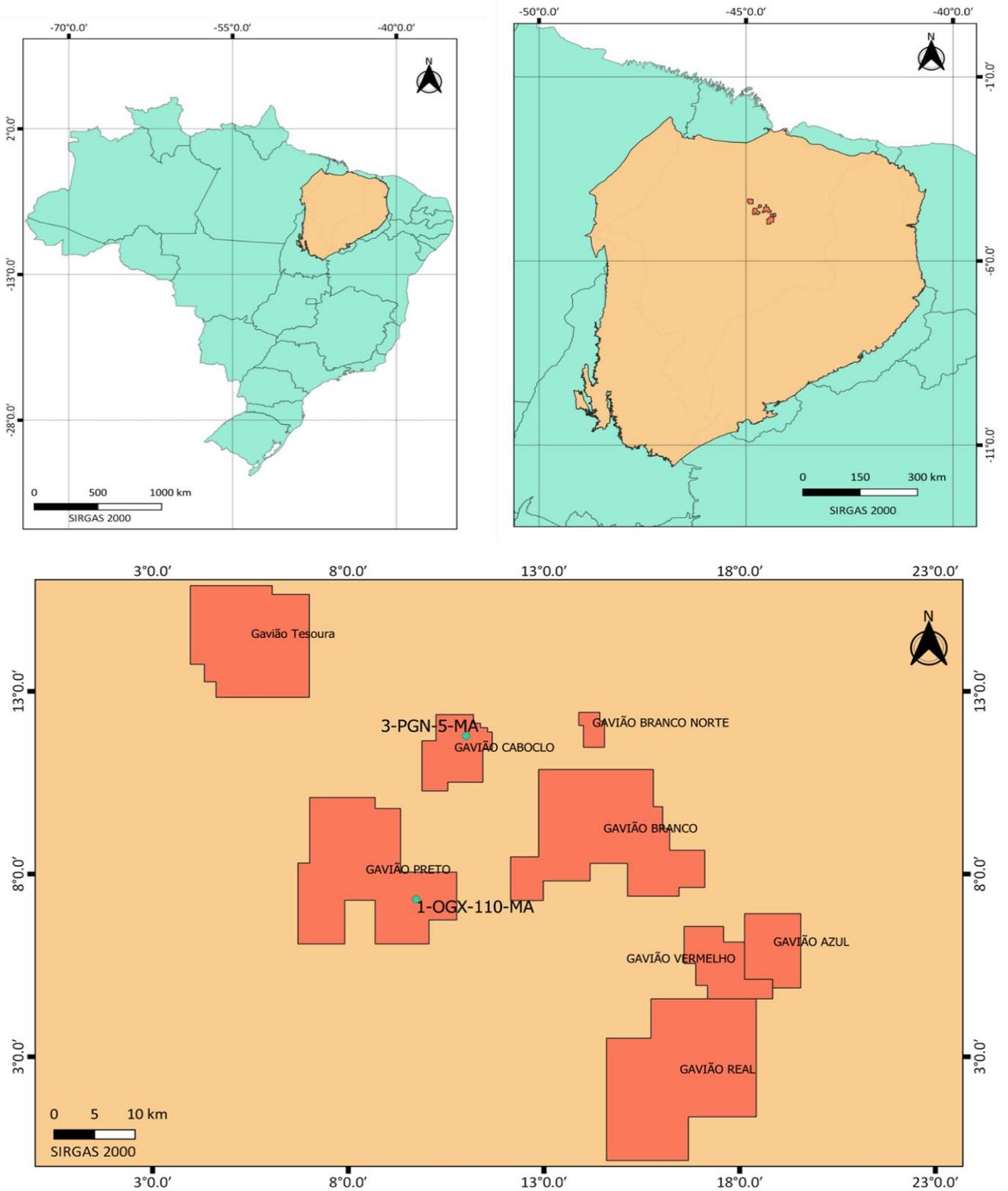


Figura 13: Mapa de localização dos poços utilizados nas análises. Fonte: do autor.

5.1.2. XRF

O equipamento utilizado para as análises químicas de XRF foi o *Epsilon 1* da Malvern Panalytical (figura 14), configurado no modo *Omnian*, composto por um espectrômetro, um computador embutido e um software de análise integrado, fornecendo a cada leitura, os elementos presentes nas amostras e suas respectivas concentrações.



Figura 14: Foto do equipamento XRF de bancada *Epsilon 1*. Fonte: Malvern Panalytical (2021)

5.2. Métodos

O fluxo de trabalho adotado neste estudo pode ser dividido em 3 fases, pré-análise, análise e pós-análise. A primeira fase inclui as etapas de amostragem, secagem e preparação para análise. A segunda fase consiste na leitura das amostras no equipamento e a terceira e última fase na exportação e formatação dos dados, nas análises estatísticas, na integração dos dados, na quimioestratigrafia e na correlação de poços. O fluxograma de trabalho adotado está representado na figura 15.

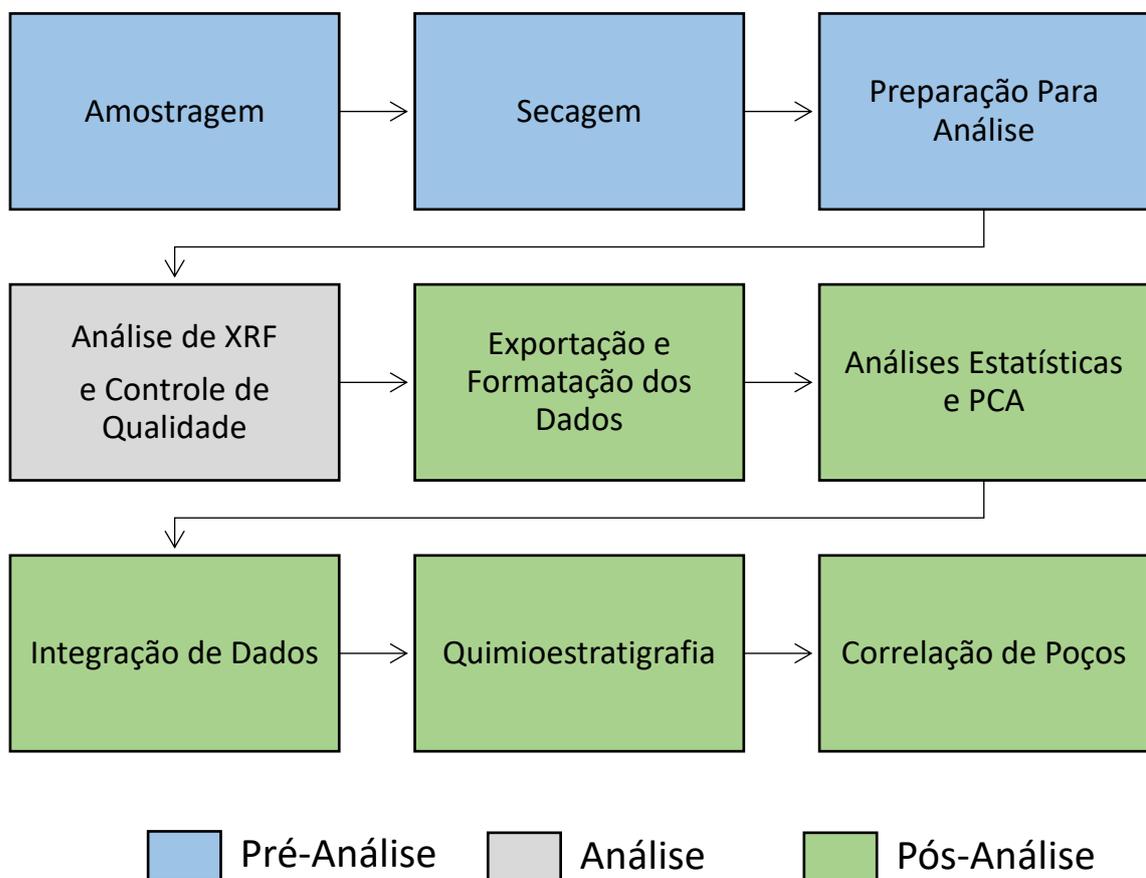


Figura 15: Fluxograma de trabalho adotado.

5.2.1. Pré-Análise

5.2.1.1 Amostragem

As amostras de calha utilizadas nesse trabalho foram lavadas e utilizadas pela equipe do projeto para fins de redescrições litológicas dos poços. Nesse processo, foram retiradas dos sacos de pano (figura 16A) pequenas amostras de cada intervalo e colocadas em calhas metálicas (figura 16B) para lavagem mecânica com água a fim de se retirar o excesso de fluido de perfuração e outros possíveis contaminantes.

As amostras utilizadas para as análises químicas, foram reutilizadas após descrição (figura 16C) sendo separadas em pequenos sacos plásticos do tipo *zip lock* (figura 16D) e devidamente identificadas com o nome do poço, litologia e respectivas profundidades.

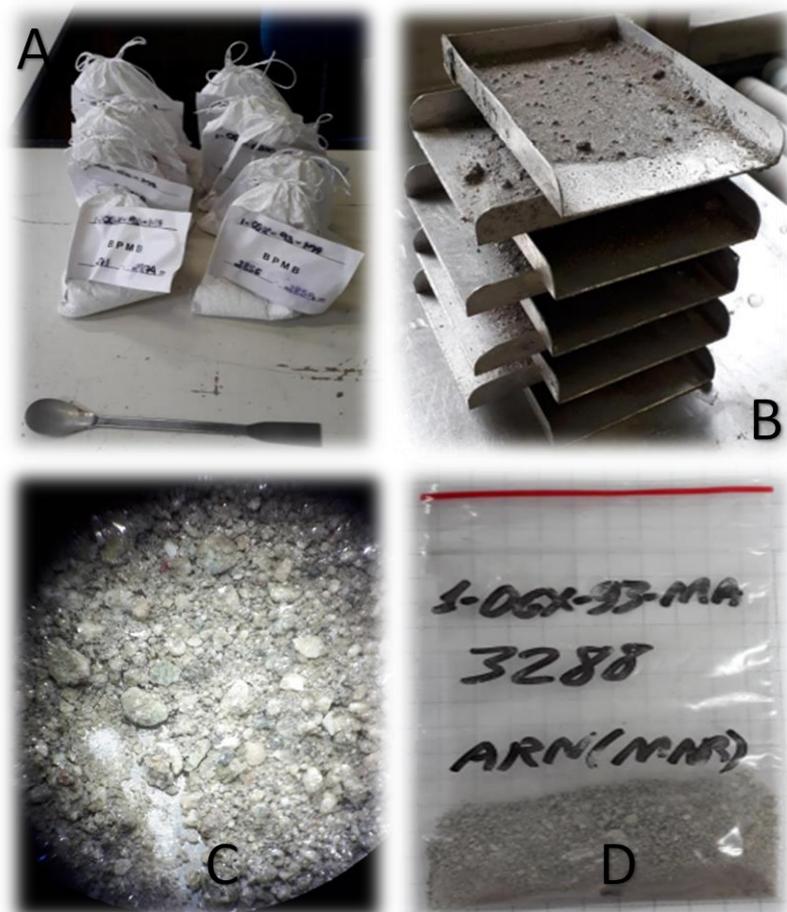


Figura 16: Fotos exemplificando os processos de amostragem (A), lavagem (B), descrição (C) e armazenamento das amostras de calha utilizadas no Projeto Parnaíba (D). Fonte: Ribeiro (2019).

5.2.1.2 Secagem

A metodologia para secagem das amostras adotada neste trabalho foi a de liofilização, em que as amostras são congeladas por cerca de 24h e encaminhadas para uma câmara de vácuo, aumentando-se gradativamente a temperatura e se reduzindo a pressão circunvizinha, permitindo assim que a água congelada da amostra passe diretamente da fase sólida para a fase gasosa pelo processo de sublimação. As amostras permaneceram no liofilizador (figura 17) por cerca de 72h. O equipamento utilizado para essa etapa foi o liofilizador disponibilizado pelo laboratório de Geologia Sedimentar do Instituto de Geociências da UFF.



Figura 17: Etapa de secagem das amostras no liofilizador. Fonte: Ribeiro (2019)

5.2.1.3 Preparação para Análise

As amostras já secas foram maceradas em gral de ágata e homogeneizadas, sendo inseridas em recipientes próprios do equipamento. As figuras 18A a 18E ilustram o procedimento realizado nesta etapa de preparação para as leituras.

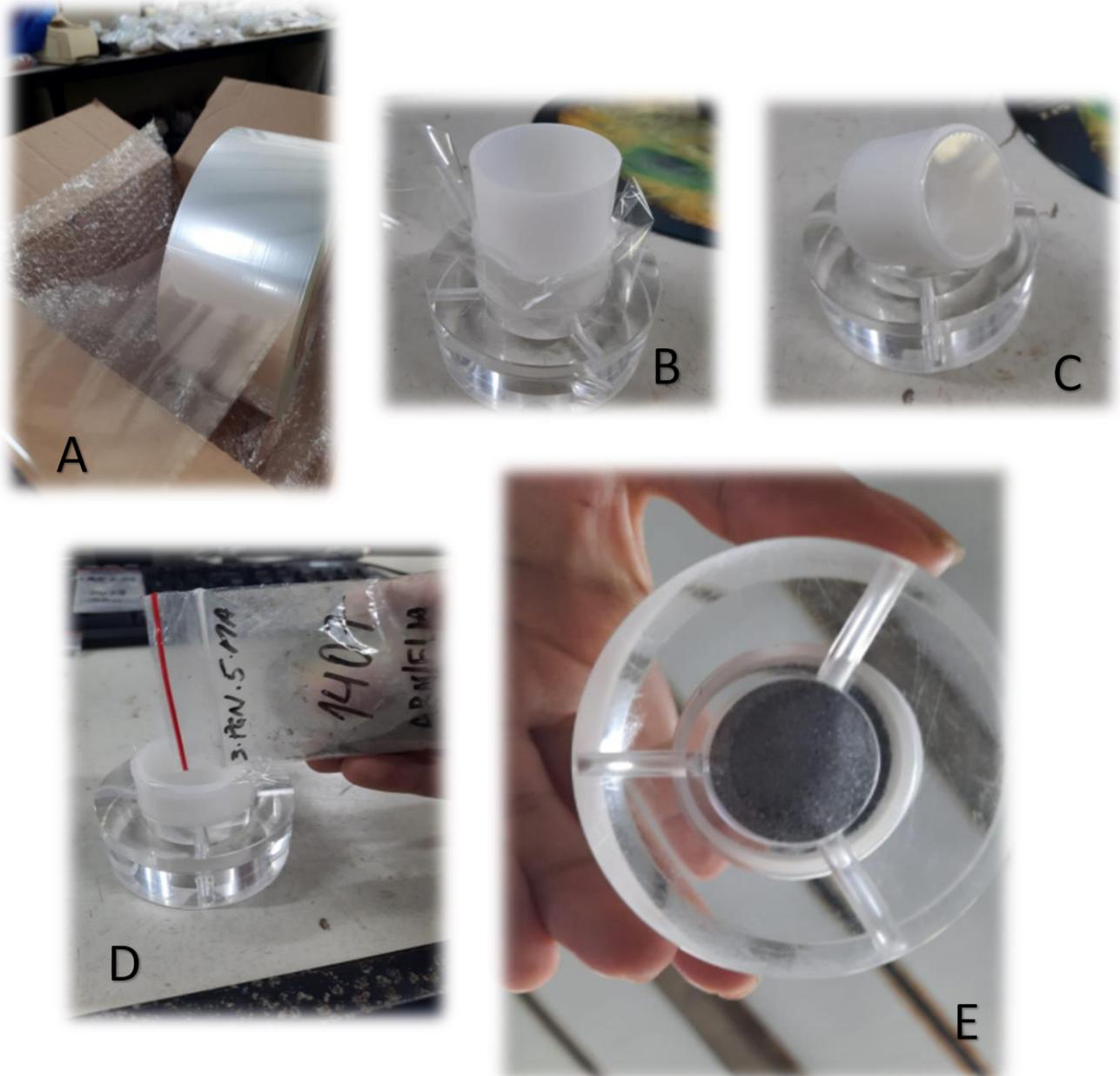


Figura 18: Preparação dos recipientes e amostragem para análise no equipamento. película protetora transparente (A), encaixe dos cilindros com a película para formação da base para análise (B), recipiente pronto para ser utilizado (C), inserção da amostra no recipiente (D) superfície de contato da amostra com o leitor do equipamento (E).

5.2.2 Análise

Cada amostra foi inserida no equipamento e lida individualmente por cerca de 10 minutos, tempo que foi estipulado para análise após alguns testes e que indicaram bons resultados. A fim de se obter um controle da qualidade dos dados adquiridos, também foram realizadas duplicatas, ou seja, segundas leituras, a cada 10 amostras.

Após finalizada a leitura, uma tabela com os elementos químicos presentes na amostra e suas respectivas concentrações é gerada. Enfim, realiza-se uma análise e uma limpeza do espectro lido (figura 19) a fim de apontar possíveis elementos não identificados e elementos erroneamente contabilizados.

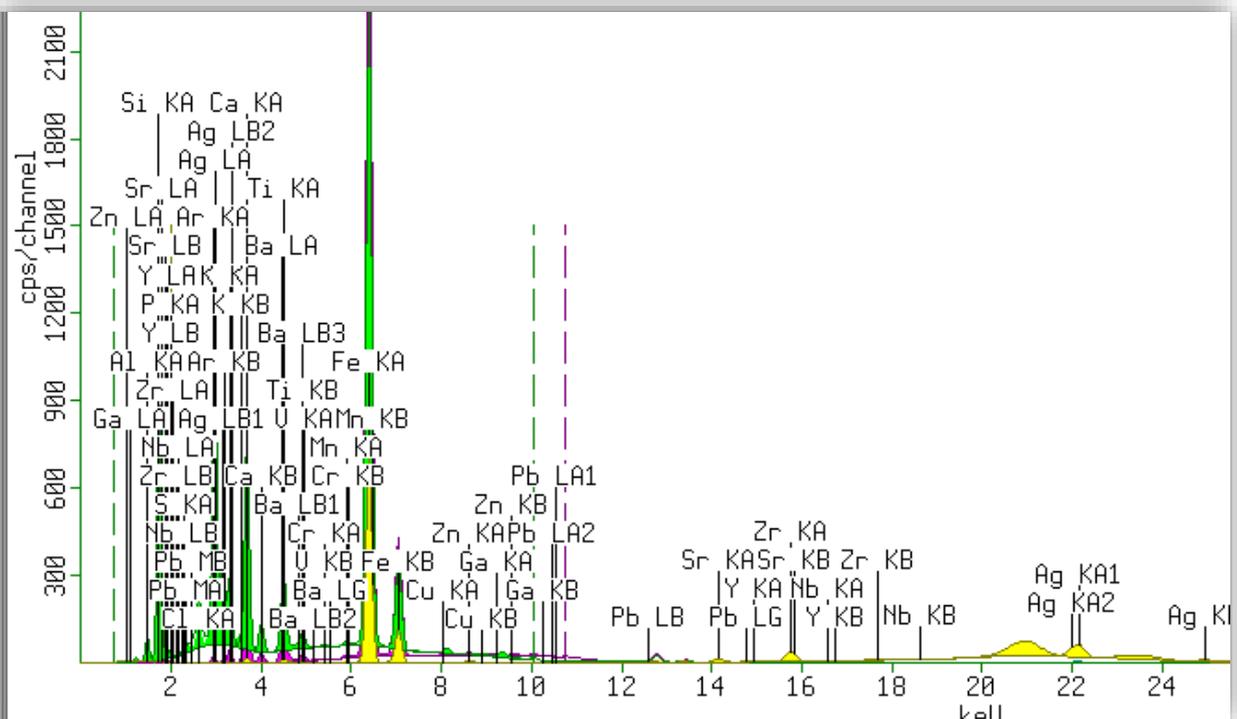


Figura 19: Espectro de XRF após leitura feita no equipamento.

Os elementos são classificados quanto a abundância em maiores, menores e traços. Os elementos que apresentam concentração acima de 5% são maiores, entre 1 e 5% são menores e abaixo de 1% são traços.

Para este estudo, foram obtidos dados químicos de 10 elementos maiores e menores, Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Ferro (Fe) e Bário (Ba), cujas concentrações são apresentadas em porcentagem e de 21 elementos-traço, Fósforo (P), Vanádio (V),

Cromo (Cr), Manganês (Mn), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Bromo (Br), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y), Zircônio (Zr), Estanho (Sn), Gadolínio (Gd), Hólmio (Ho), Itérbio (Yb), Chumbo (Pb), Tório (Th) e Urânio (U), medidos em ppm (partes por milhão) para ambos os poços.

5.2.3 Pós-Análise

5.2.3.1 Exportação e Formatação dos Dados

Os dados apurados foram exportados em formato .txt para o Excel para que a partir dos dados geoquímicos encontrados das amostras analisadas fossem elaborados cálculos, razões e gráficos para auxiliar na visualização e na interpretação das informações obtidas (figura 20).

Em seguida, os dados foram formatados e exportados para o software Trace, disponibilizado gratuitamente pela K2 Sistemas e que foi escolhido como plataforma para integração com os demais dados do projeto, tais como os de litologia e de perfis geofísicos de poços (figura 21).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1			Mg		Al		Si	
2	ID	Depth(m)	C	Unit	C	Unit	C	Unit
3	3-PGN-5-MA 1122	1122	3,306	%	5,273	%	30,870	%
4	3-PGN-5-MA 1125	1125	3,266	%	4,355	%	36,119	%
5	3-PGN-5-MA 1128	1128	2,742	%	5,537	%	31,944	%
6	3-PGN-5-MA 1131	1131	2,045	%	10,745	%	35,206	%
7	3-PGN-5-MA 1134	1134	1,682	%	8,152	%	41,241	%
8	3-PGN-5-MA 1137	1137	1,629	%	5,977	%	49,267	%
9	3-PGN-5-MA 1140	1140	1,618	%	3,930	%	48,336	%
10	3-PGN-5-MA 1143	1143	1,460	%	3,076	%	64,213	%
11	3-PGN-5-MA 1146	1146	1,467	%	5,852	%	52,372	%
12	3-PGN-5-MA 1149	1149	1,586	%	4,481	%	60,815	%
13	3-PGN-5-MA 1152	1152	1,525	%	5,323	%	58,476	%
14	3-PGN-5-MA 1155	1155	1,280	%	7,339	%	52,465	%
15	3-PGN-5-MA 1158	1158	1,336	%	6,488	%	58,360	%

Figura 20: Ambiente de trabalho da etapa de exportação e formatação dos dados.

Janela do software Excel.

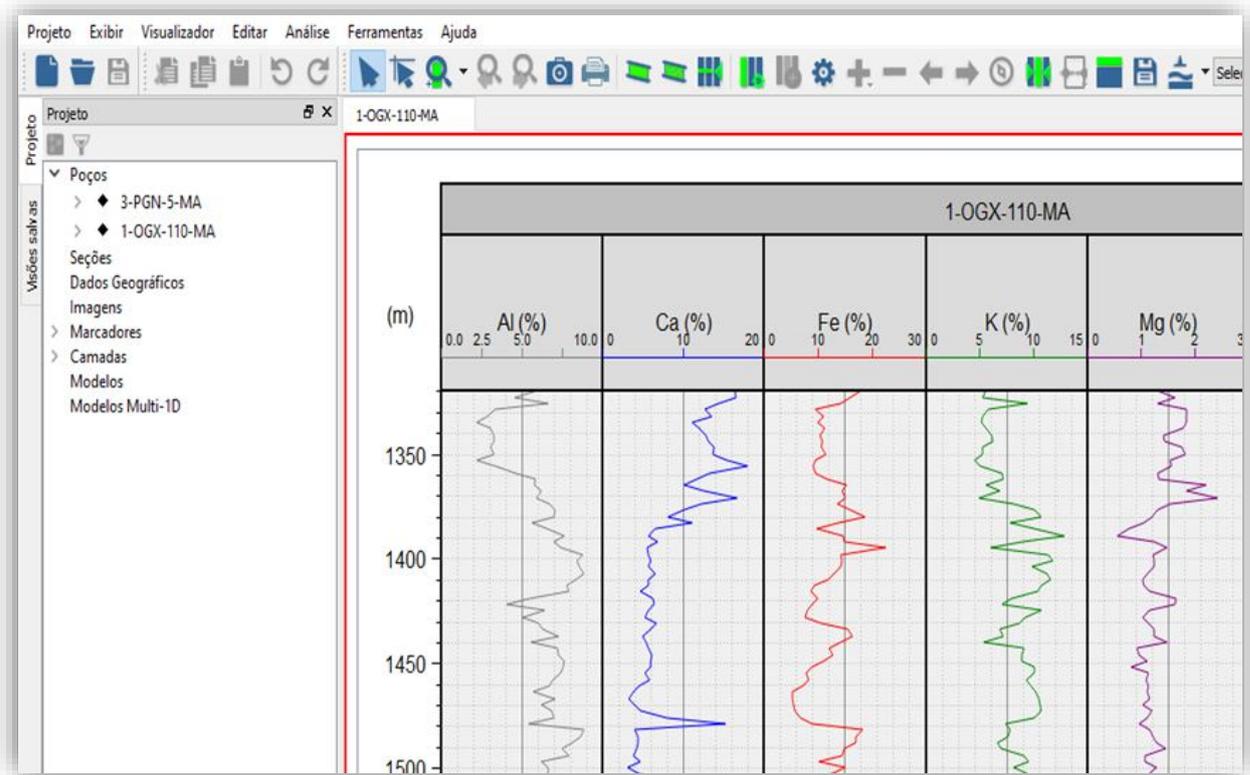


Figura 21: Ambiente de trabalho da etapa de exportação e formatação dos dados.
Janela do software Trace.

5.2.3.2 Análises Estatísticas e de Componentes Principais (PCA)

Nesta etapa, foram gerados resultados estatísticos dos dados obtidos, através de tabelas e gráficos com valores de mínimo e máximo, média e desvio padrão, além da Análise de Componentes Principais (PCA), uma técnica estatística utilizada para transformar um conjunto de dados em combinações lineares, reduzindo-se o número de dados sem perda significativa de informação e facilitando a interpretação. Os gráficos e análises estatísticas básicas foram feitos no Excel e o PCA no Software RStudio, utilizando scripts em linguagem de programação R.

5.2.3.3 Integração dos Dados

Nesta etapa, foram selecionadas as curvas de elementos e razões a serem utilizadas no trabalho. Os perfis geoquímicos obtidos da análise de XRF foram integrados aos perfis litológicos e aos perfis geofísicos de poços no software Trace. Os perfis litológicos utilizados nesse trabalho, foram confeccionados a partir da redescrição das amostras de calha pelos pesquisadores Ilson Filho e Lidia Calonio, membros do Projeto Parnaíba. Já os perfis geofísicos dos poços foram importados do banco de dados da ANP.

5.2.3.4 Químioestratigrafia

Em um primeiro momento, as curvas geoquímicas foram analisadas junto com os demais perfis (geofísicos e litológicos) e foram identificadas superfícies químioestratigráficas servindo como base para a delimitação e caracterização do diabásio no poço 3-PGN-5-MA, e na caracterização dos arenitos da porção Poti 2 tanto no 3-PGN-5-MA quanto no 1-OGX-110-MA.

Mais adiante, foram selecionadas razões elementares/proxies geoquímicas que auxiliaram na identificação em ambos os poços de unidades químioestratigráficas servindo como base para interpretações paleoambientais e paleodeposicionais.

5.2.3.5 Correlação entre os Poços

Por fim, apesar da necessidade de algumas correções de profundidade em relação aos diferentes tempos de retorno das amostras de calha em cada poço, o estudo traz nessa última etapa uma proposta de correlação químioestratigráfica inicial. Para tal correlação, as profundidades em ambos os poços foram colocadas em cota a partir dos valores de Mesa Rotativa disponíveis nos perfis compostos da seguinte forma:

$$\textit{Profundidade em Cota} = \textit{Mesa Rotativa} - \textit{Profundidade Medida (Calha)}$$

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados deste estudo obtidos através de tabelas, gráficos e integração de perfis, tais como delimitação e caracterização de fácies com base em variações mineralógicas, interpretações paleoambientais e paleodeposicionais e correlações quimioestratigráficas da Formação Poti nos poços analisados.

6.1 Controle de Qualidade

Com a finalidade de testar inicialmente a qualidade dos dados adquiridos, foi feito um pequeno estudo com 3 pares de elementos, Al e Ga, K e Rb e Sr e Ca. As concentrações desses elementos foram plotadas em função da profundidade junto com os dados das duplicatas realizadas a cada 10 amostras nos poços PGN 5 e OGX 110 (figuras 22 e 23). Considera-se a existência de uma relação entre estes 3 pares, devido ao fato de se apresentarem no mesmo mineral, como o K e o Rb nos álcali-feldspatos, o Al e o Ga nos feldspatos e o Ca e o Sr nas calcitas (Sial & McReath, 1984). Neste último, a relação será alterada apenas se parte do Ca presente na rocha vier dos Ca-plagioclásios, entretanto, isso só ocorre nas rochas ígneas, devido a fácil alteração deste mineral.

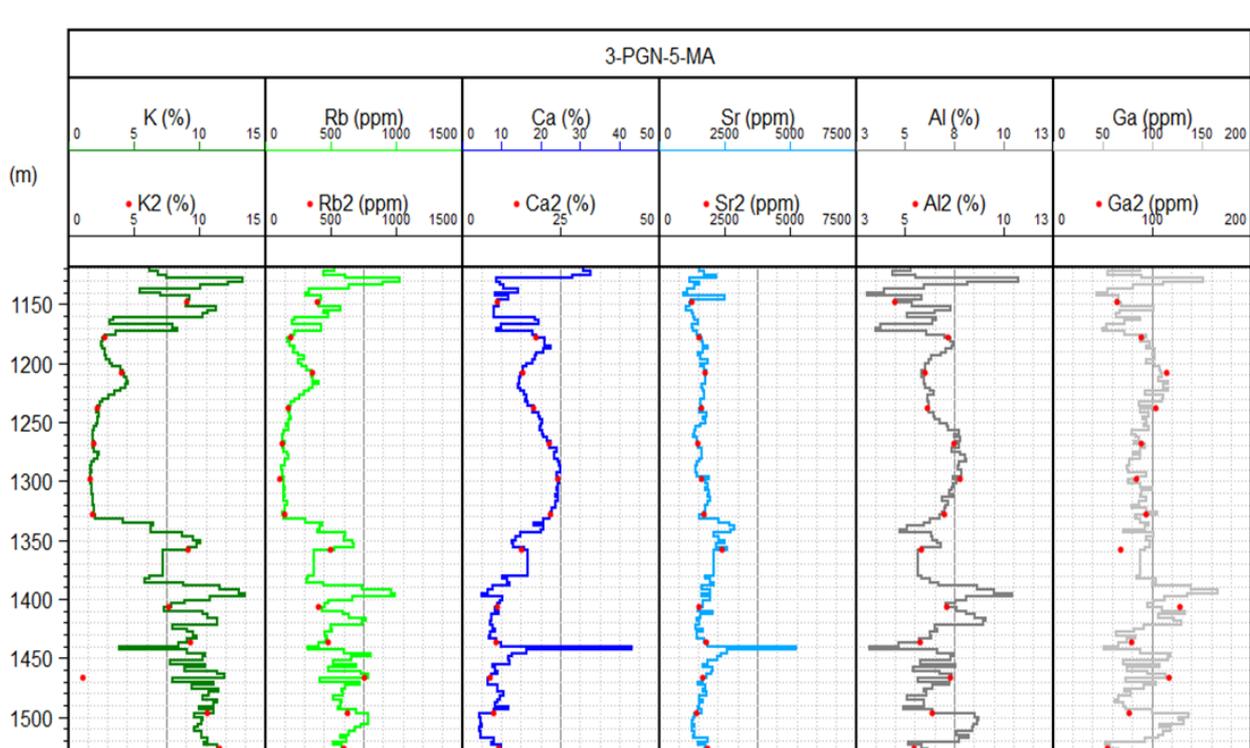


Figura 22: Resultados do controle de qualidade das curvas de K, Rb, Ca, Sr, Al e K no poço 3-PGN-5-MA. Os pequenos círculos vermelhos indicam as leituras das duplicatas.

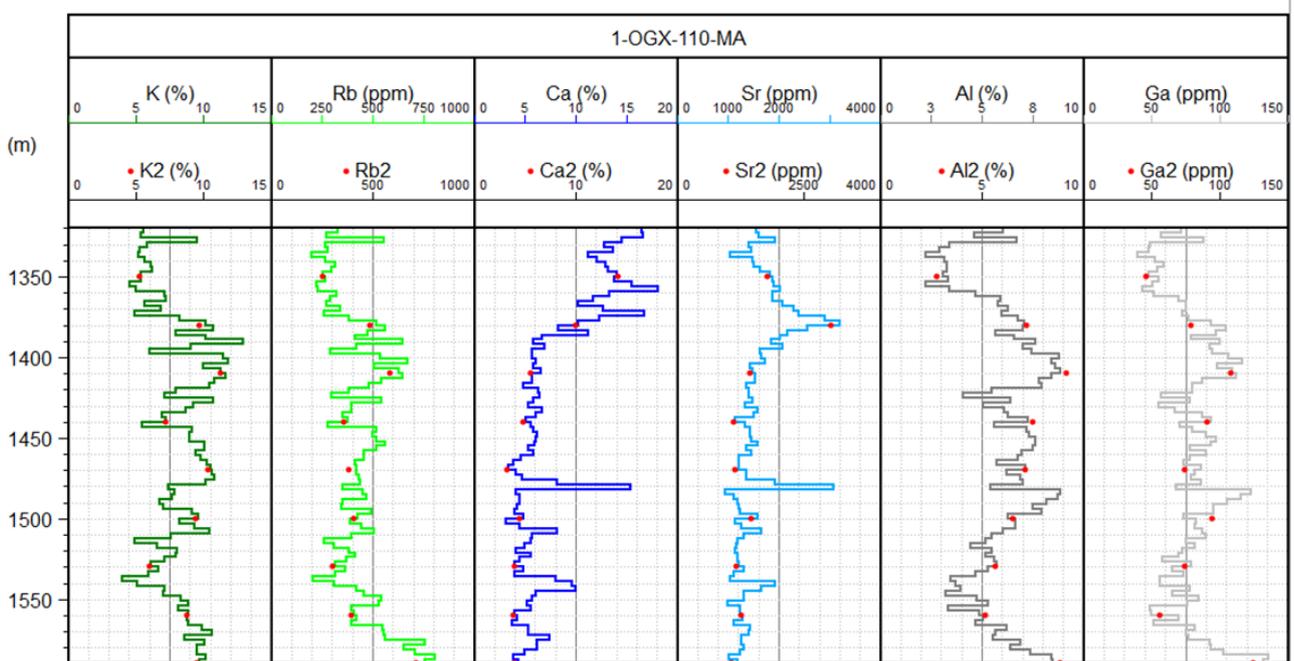


Figura 23: Resultados do controle de qualidade das curvas de K, Rb, Ca, Sr, Al e K no poço 1-OGX-110-MA. Os pequenos círculos vermelhos indicam as leituras das duplicatas.

A partir da análise das curvas mostradas nas figuras 22 e 23, pode-se observar um comportamento bastante parecido dos pares de elementos estudados. Com exceção do intervalo referente a soleira de diabásio (1175/1332m) no poço 3-PGN-5-MA, as curvas dos pares elementares K e Rb, Ca e Sr e Al e Ga se mostraram praticamente idênticas nos dois poços, indicando que os dados de XRF estão bem coerentes e apresentam o comportamento esperado.

Além disso, o resultado das duplicatas foi bastante satisfatório, visto que os pontos da segunda leitura, plotados em vermelho no gráfico, não divergem tanto dos pontos da leitura principal na maioria das profundidades, acompanhando bem as curvas.

6.2 Análise Estatística dos Dados

Os resultados da análise estatística dos dados obtidos para os poços PGN 5 e OGX 110 estão representados a seguir em forma de tabela (tabelas 2 a 7) tanto para os elementos maiores e menores (Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Fe e Ba), cujas concentrações estão em porcentagem, quanto para os elementos-traço (P, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Sn, Gd, Ho, Yb, Pb, Th e U), medidos em ppm.

Tabela 3: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para todos os elementos maiores e menores analisados no poço 3-PGN-5-MA.

3-PGN-5-MA(Poti+Diabásio+Poti2)										
	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	S(%)	Cl(%)	K(%)	Ca(%)	Ti(%)	Fe(%)	Ba(%)
MIN	1,033	3,076	23,165	0,261	1,562	1,700	4,494	0,656	4,116	0,487
MAX	3,996	10,745	64,213	4,291	9,655	13,476	42,981	4,112	37,670	3,443
MED	2,022	6,711	38,670	1,168	4,134	6,532	14,988	2,026	20,381	1,362
DP	0,797	1,294	12,225	0,622	1,646	3,758	7,160	0,636	10,329	0,533

Tabela 4: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para todos os elementos-traço analisados no poço 3-PGN-5-MA.

3-PGN-5-MA(Poti+Diabásio+Poti2)							
	P(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Mn(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)
MIN	5194,8	93,7	0,0	933,0	480,3	0,0	106,1
MAX	9644,3	1902,6	799,7	5516,4	3138,8	647,7	2513,8
MED	6808,2	554,5	72,2	3334,6	1789,4	165,2	571,5
DP	1162,7	326,9	148,5	1416,2	810,6	153,3	501,8
	Zn(ppm)	Ga(ppm)	Br(ppm)	Rb(ppm)	Sr(ppm)	Y(ppm)	Zr(ppm)
MIN	85,9	44,6	30,1	123,1	930,9	63,6	457,0
MAX	2330,4	165,8	715,0	1030,0	5208,1	305,9	6505,0
MED	412,4	92,3	210,3	417,8	1725,2	165,5	1832,4
DP	297,1	21,1	153,8	226,5	461,9	58,8	1234,0
	Sn(ppm)	Gd(ppm)	Ho(ppm)	Yb(ppm)	Pb(ppm)	Th(ppm)	U(ppm)
MIN	84,0	0,0	171,7	53,4	40,1	0,0	0,0
MAX	270,0	882,4	1273,9	401,7	1074,5	140,4	58,5
MED	165,4	437,3	783,7	235,1	139,7	38,4	21,7
DP	36,5	199,5	256,5	72,7	127,6	33,8	16,1

Tabela 5: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos maiores e menores da porção Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA.

3-PGN-5-MA(Poti2)										
	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	S(%)	Cl(%)	K(%)	Ca(%)	Ti(%)	Fe(%)	Ba(%)
MIN	1,085	3,212	24,188	0,367	1,562	2,062	4,494	1,003	4,116	0,487
MAX	2,602	10,436	58,791	4,291	9,655	13,476	42,981	2,755	32,863	3,443
MED	1,548	6,819	46,323	1,482	5,374	9,397	10,592	1,911	13,102	1,420
DP	0,299	1,363	7,698	0,751	1,543	2,145	5,998	0,382	6,152	0,635

Tabela 6: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos-traço da porção Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA.

3-PGN-5-MA(Poti2)							
	P(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Mn(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)
MIN	5383,6	179,9	0,0	933,0	480,3	0,0	107,0
MAX	9644,3	944,5	195,4	5516,4	2813,2	339,8	837,6
MED	7611,3	413,7	34,5	2375,3	1258,7	104,7	250,4
DP	730,9	144,5	57,4	952,6	538,0	60,7	138,0
	Zn(ppm)	Ga(ppm)	Br(ppm)	Rb(ppm)	Sr(ppm)	Y(ppm)	Zr(ppm)
MIN	85,9	52,4	32,2	144,4	1279,1	63,6	556,5
MAX	2330,4	165,8	715,0	986,4	5208,1	295,5	6505,0
MED	370,4	96,0	324,9	579,4	1876,3	184,2	2859,1
DP	398,7	23,9	142,8	160,3	584,3	52,2	1055,3
	Sn(ppm)	Gd(ppm)	Ho(ppm)	Yb(ppm)	Pb(ppm)	Th(ppm)	U(ppm)
MIN	99,5	0,0	313,4	53,4	62,7	0,0	0,0
MAX	270,0	800,6	1273,9	334,1	1074,5	138,3	58,5
MED	165,5	327,9	868,8	208,9	189,8	57,0	30,1
DP	37,8	153,1	193,7	61,3	171,4	25,2	13,5

Tabela 7: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos maiores e menores analisados no poço 1-OGX-110-MA.

1-OGX-110-MA (Poti 2)										
	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	S(%)	Cl(%)	K(%)	Ca(%)	Ti(%)	Fe(%)	Ba(%)
MIN	0,560	2,262	42,971	0,129	1,877	4,039	3,184	0,718	5,464	0,521
MAX	2,431	8,864	64,784	6,343	5,492	12,885	18,139	2,773	22,683	3,158
MED	1,304	5,899	54,540	1,069	3,733	8,152	7,628	1,673	12,608	1,457
DP	0,308	1,673	5,283	1,075	0,805	2,053	3,866	0,431	3,851	0,567

Tabela 8: Resumo estatístico dos valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) para os elementos-traços analisados no poço 1-OGX-110-MA.

1-OGX-110-MA (Poti 2)							
	P(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Mn(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)
MIN	6288,6	125,9	0,0	702,5	543,7	0,0	104,5
MAX	9787,3	527,4	166,9	4283,8	2124,8	208,9	532,6
MED	7786,6	310,9	17,6	1900,3	1204,1	74,1	193,1
DP	673,8	83,8	33,2	791,0	339,3	45,1	65,5
	Zn(ppm)	Ga(ppm)	Br(ppm)	Rb(ppm)	Sr(ppm)	Y(ppm)	Zr(ppm)
MIN	93,2	40,1	24,4	197,2	950,3	50,8	794,2
MAX	1999,4	122,8	630,3	758,9	3191,1	247,4	7552,7
MED	433,1	77,7	308,4	412,9	1546,0	153,4	2931,7
DP	386,1	18,5	130,5	117,2	439,3	45,7	1284,0
	Sn(ppm)	Gd(ppm)	Ho(ppm)	Yb(ppm)	Pb(ppm)	Th(ppm)	U(ppm)
MIN	79,3	96,2	412,1	122,0	22,9	0,0	6,6
MAX	302,7	734,2	1366,3	311,9	732,3	152,9	52,8
MED	164,0	385,4	895,8	216,8	153,1	54,9	29,0
DP	38,2	129,1	193,6	40,6	159,8	28,0	10,6

Foram realizadas duas análises estatísticas para o poço 3-PGN-5-MA, uma considerando todas as amostras lidas (tabelas 2 e 3), contemplando assim as porções Poti, Diabásio e Poti 2, e outra considerando somente os dados referentes a porção Poti 2 (tabelas 4 e 5). Já para o poço OGX -110, os resultados referentes a porção Poti 2 estão dispostos nas tabelas 6 e 7.

Os resultados da análise estatística para os dois poços também foram representados em forma de gráficos, tanto para os elementos maiores e menores (figura 24) quanto para os elementos-traço (figuras 25 e 26). Os valores de mínimo (MIN) e máximo (MAX), média (MED) e desvio padrão (DP) foram plotados para os 3 seguintes conjuntos de dados, Poti + Diabásio + Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA, somente o Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA e somente o Poti 2 no poço 1-OGX-110-MA.

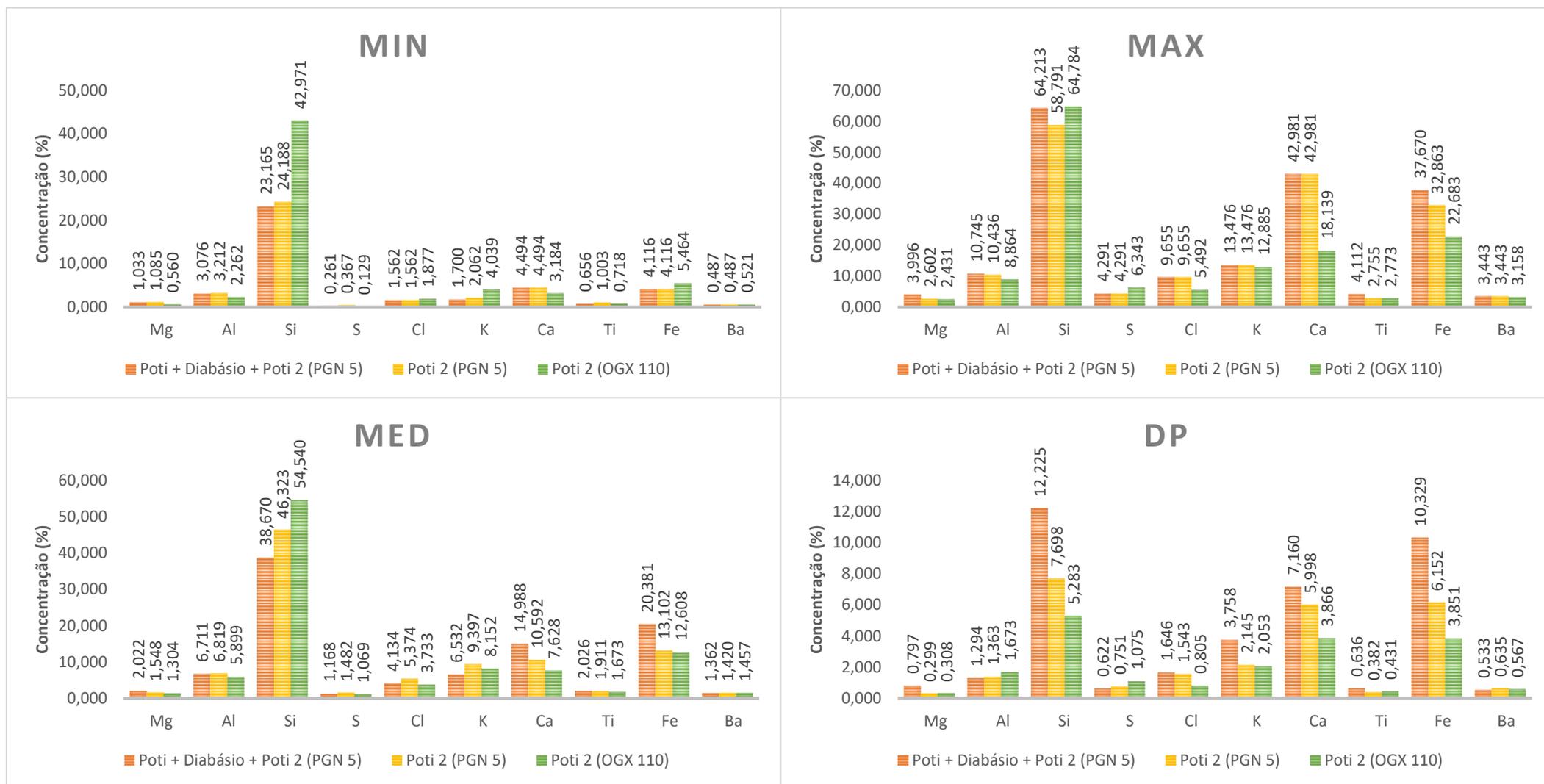


Figura 24: Gráficos de mínimos (MIN), máximos, médias (MED) e desvios-padrão (DP) para os elementos maiores e menores nos poços 1-OGX-110-MA e 3-PGN-5-MA.



Figura 25: Gráficos de mínimos (MIN), máximos, médias (MED) e desvios-padrão (DP) para elementos-traço nos poços 1-OGX-110-MA e 3-PGN-5-MA.

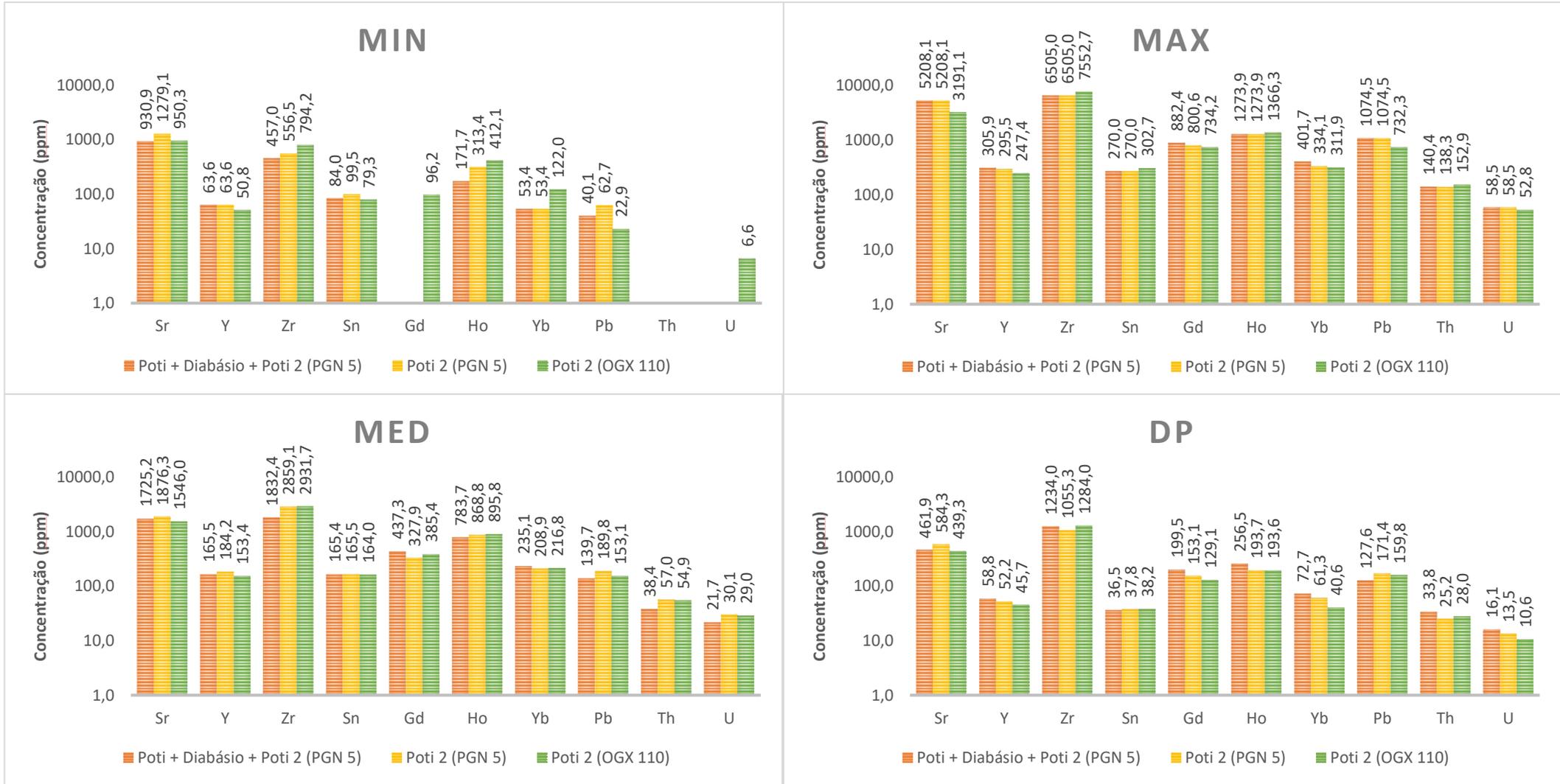


Figura 26: Gráficos de mínimos (MIN), máximos, médias (MED) e desvios-padrão (DP) para elementos-traço nos poços 1-OGX-110-MA e 3-PGN-5-MA.

Com base nas tabelas e nos gráficos acima, foi observada uma forte variação nos dados, devido principalmente ao contraste de litologias e a influência da composição química do diabásio nas análises.

Alguns valores mais discrepantes nos elementos maiores e menores estão relacionados ao Magnésio (Mg), Silício (Si), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe), e nos elementos-traço Vanádio (V), Cromo (Cr), Cobre (Cu), e Cobalto (Co), indicando uma provável ligação desses elementos com a intrusão ígnea. O teor médio de Ferro (Fe), por exemplo, cai de 20,381% para 13,102% quando são consideradas somente as amostras do Poti 2. No caso do Silício (Si), elemento importantíssimo na análise dos arenitos, o valor médio aumenta de 38,670% na análise geral para 46,323% na análise somente do Poti 2.

A fim de tornar a análise geoquímica um pouco menos complexa e facilitar interpretações e correlações, a maioria das discussões apresentadas nesse estudo tiveram como foco principal a porção Poti 2 de ambos os poços. Dessa forma, os dados de XRF referentes as porções Poti e Diabásio no poço 3-PGN-5-MA, nesse trabalho, serão utilizados somente para uma delimitação e caracterização preliminar da intrusão ígnea nesse poço, podendo ser objeto de estudos mais apurados em trabalhos futuros.

A partir da análise dos dados estatísticos referentes a porção Poti 2 nos dois poços, podemos observar que no poço 1-OGX-110-MA, os teores de Silício variam de 42,971% a 64,784%, com média de 54,540%, sendo maiores que os valores encontrados para o poço 3-PGN-5-MA, que variam de 24,188% a 58,791%, com média de 46,323%. Por outro lado, no poço 3-PGN-5-MA os teores de Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe) de forma geral, são mais altos que os teores referentes ao poço 1-OGX-110-MA.

Quanto aos elementos-traço, o poço 1-OGX-110-MA apresenta, em geral, maiores valores de Zinco (Zn), Zircônio (Zr), Gadolínio (Gd), Hólmio (Ho) e Itérbio (Yb) e menores valores de Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Gálio (Ga), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y) e Chumbo (Pb) quando comparado com o poço 3-PGN-5-MA. Os teores de Estanho (Sn), Urânio (U) e Tório (Th) nos dois poços são bastante parecidos.

6.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

Com o intuito de visualizar graficamente os dados e comparar mais facilmente os dois poços de maneira preliminar, foi feito um pequeno estudo de Análise de Componentes Principais (PCA) com os seguintes elementos, Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Potássio (K), Ferro (Fe), Titânio (Ti), Silício (Si) e Alumínio (Al). Estes 7 elementos foram selecionados pelo fato de apresentarem as maiores concentrações nas amostras, estarem sempre presentes nas leituras e serem elementos importantes no estudo de variações de litologia. Além disso, a utilização de um número muito grande de elementos tornaria a visualização e interpretação um pouco mais complexas. Dessa forma, uma análise mais completa com todos os elementos ficará para projetos futuros.

A análise de PCA é uma técnica estatística utilizada para transformar um conjunto de dados em combinações lineares, reduzindo-se o número de dados sem perda significativa de informação e facilitando a interpretação.

Torna-se possível então identificar associações importantes de elementos, pois os elementos que ocorrem juntos na mesma área dos gráficos de autovetores têm distribuições semelhantes e provavelmente têm afinidades mineralógicas semelhantes (Craigie, 2015).

Os resultados de PCA encontrados tanto para o poço 3-PGN-5-MA quanto para o poço 1-OGX-110-MA estão dispostos nas tabelas 8 e 9 e nos gráficos da figura 27.

Tabela 9: Análise de PCA realizada nas amostras do poço 3-PGN-5-MA.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Standard deviation	1.8936	1.4352	0.6980	0.68674	0.55692	0.27418	0.10228
Proportion of variance	0.5122	0.2943	0.0696	0.06737	0.04431	0.01074	0.00149
Cumulative Proportion	0.5122	0.8065	0.8761	0.94346	0.98777	0.99851	1.00000
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Mg(%)	-0.4389482	-0.02316860	0.5846538	-0.07073067	0.66788198	0.1006729	0.061346253
Ca(%)	-0.4687759	0.09377991	-0.1658557	0.59914938	-0.11401784	-0.2267794	0.566160238
K(%)	0.4749893	0.04335466	-0.2326260	0.39284281	0.45508272	0.5567158	0.216869805
Fe(%)	-0.2367616	-0.56600549	-0.2261494	-0.44945293	-0.12564436	0.3993534	0.441769823
Ti(%)	0.2363437	-0.48782346	0.6207064	0.40013992	-0.38170628	0.1226021	0.007112315
Si(%)	0.4043603	0.37699885	0.3378014	-0.34572231	-0.08744903	-0.1713418	0.650942059
Al(%)	0.2941719	-0.53696075	-0.1613294	0.00692182	0.40583222	-0.6516373	0.098640678

Tabela 10: Análise de PCA realizada nas amostras do poço 1-OGX-110-MA.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Standard deviation	1.8218	1.4223	0.8941	0.65450	0.53719	0.35268	0.13171
Proportion of Variance	0.4741	0.2890	0.1142	0.06119	0.04123	0.01777	0.00248
Cumulative Proportion	0.4741	0.7631	0.8773	0.93853	0.97975	0.99752	1.00000
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Mg(%)	-0.42492133	-0.1917707	0.1574019	-0.83424187	0.06926245	0.23750664	0.02691247
Ca(%)	-0.40526612	-0.2028821	-0.6458798	0.11437818	-0.31045052	-0.02712004	0.51695268
K(%)	0.45032745	0.2236088	-0.4078458	-0.14156834	0.33745214	0.63833468	0.19869422
Fe(%)	0.07766681	-0.6160805	0.4259026	0.27562736	0.30205112	0.18476776	0.48132645
Ti(%)	0.46246207	-0.1751192	0.1704580	-0.16780231	-0.80553355	0.21046173	0.07120459
Si(%)	-0.06858927	0.6524024	0.3735677	-0.06355984	-0.06396016	-0.12044769	0.63833802
Al(%)	0.47728255	-0.1902921	-0.2042643	-0.40342115	0.20183942	-0.66516391	0.21985353

Nas tabelas 8 e 9, pode-se identificar a separação dos dados de ambos os poços em 7 componentes principais (PC1-PC7) de acordo com os 7 elementos (parâmetros) analisados. A análise da proporção é essencial para determinar quais componentes principais explicam a maioria da variabilidade nos dados. Quanto maior a proporção, maior a variabilidade dos dados contemplados pela componente em questão. Tanto no poço, 3-PGN-5-MA, quanto no poço 1-OGX-110-MA, as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) apresentam as maiores proporções e, conseqüentemente, exercem maior influência nas análises.

Na figura 27 estão representadas as contribuições de cada componente principal (PC) para o conjunto de dados analisado em ambos os poços. Juntas, as componentes PC1 e PC2 explicam 80,65% dos dados no poço 3-PGN-5-MA e 76,31% dos dados no poço 1-OGX-110-MA. Portanto, a visualização gráfica inicial para auxiliar na interpretação será baseada nessas duas componentes. Os gráficos *biplot* das componentes PC1 e PC2 estão representadas nas figuras 28A e 28B.

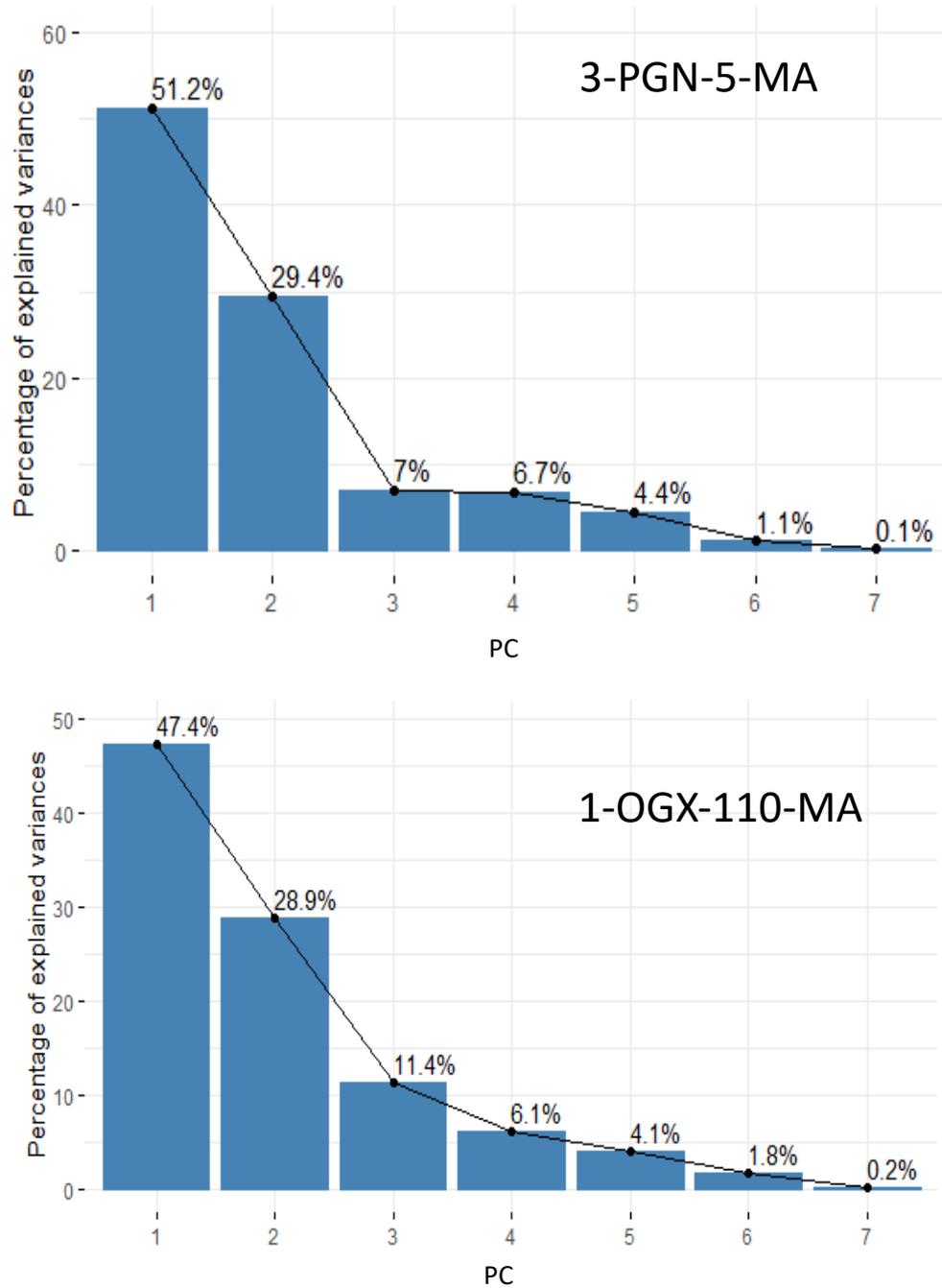


Figura 27: Resumo gráfico das componentes principais e suas respectivas contribuições no entendimento da variabilidade dos dados nos poços 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA.

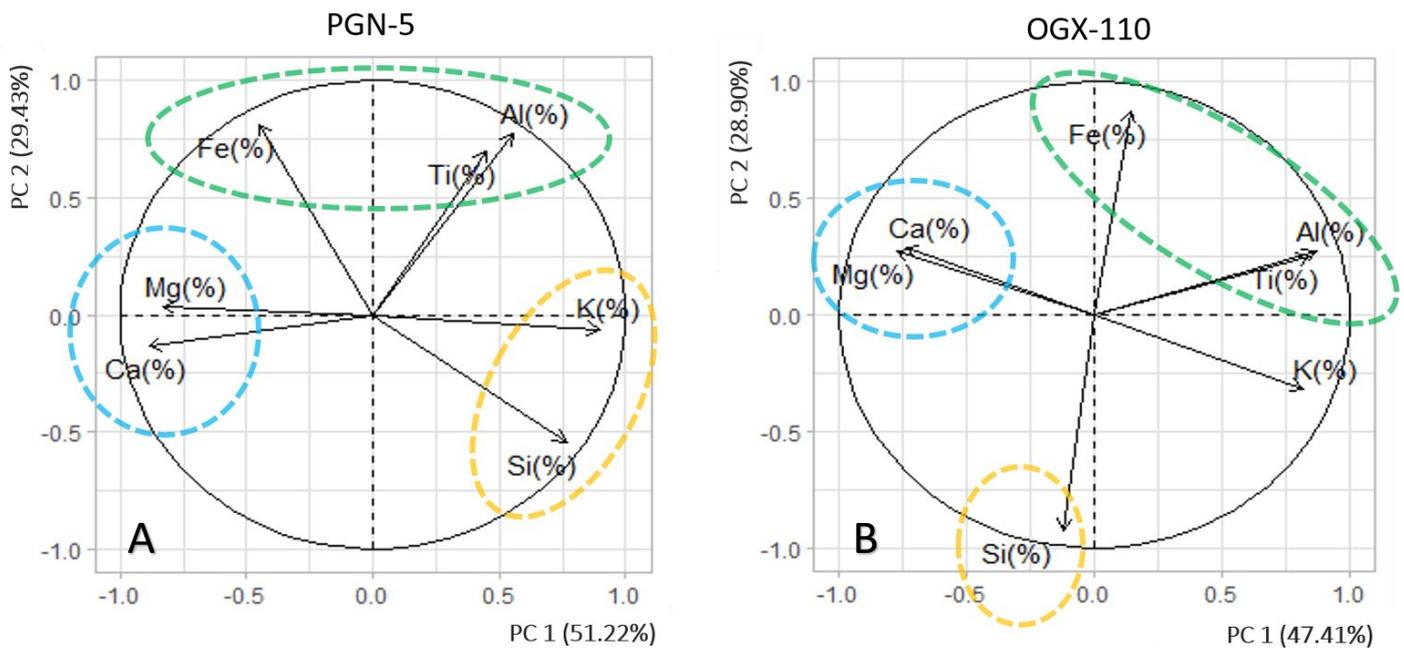


Figura 28: Correlação dos Elementos Mg, Ca, Fe, Ti, Al, K, e Si nos poços 3-PGN-5-MA (A) e 1-OGX-110-MA (B). Os círculos representam o agrupamento de elementos em rochas areníticas (amarelo), lamosas (verdes) e carbonatos (azuis).

A partir dos gráficos *biplot* representados nas figuras 28A e 28B, é possível identificar uma forte correlação positiva entre o Cálcio (Ca) e o Magnésio (Mg), e uma forte correlação negativa destes com o Potássio (K) em ambos os poços. Assim como a similaridade no comportamento do Titânio (Ti) e do Alumínio (Al) tanto no poço 3-PGN-5-MA quanto no poço 1-OGX-110-MA.

No 3-PGN-5-MA o Ferro (Fe) está mais afastado do Titânio (Ti) e do Alumínio (Al) e menos oposto ao Silício do que no poço 1-OGX-110-MA. Já o Potássio (K) tem comportamento mais próximo ao do Titânio (Ti) e do Alumínio (Al), estando mais afastado do Silício (Si) no poço 1-OGX-110-MA. Nesse último poço, Ferro (Fe) e Silício (Si) apresentam também maior correlação negativa.

Baseado na composição mineralógica das rochas sedimentares, tem-se que os carbonatos estão mais ligados aos elementos Ca e Mg, relacionados a calcita e a dolomita. Já os arenitos, são ricos em Si, Al e K, por causa do quartzo e dos feldspatos e os folhelhos são ricos em Fe, K, Al e Si, por conta das argilas e da fração silte que contém quartzo e feldspato.

É possível visualizar nas figuras 28A e 28B a separação dos vetores em 3 diferentes grupos, podendo estar relacionados às tendências de carbonato (em azul), folhelho (em verde) e arenito (em amarelo).

Pela análise dos gráficos, os arenitos do poço 1-OGX-110-MA apresentam mais quartzo e menos K-feldspatos que os arenitos do 3-PGN-5-MA, pois a seta do K está muito mais próxima do Fe.

Os arenitos do 3-PGN-5-MA possuem um pouco mais de cimentação carbonática que os do poço 1-OGX-110-MA, pois a seta do Ca está mais próxima do Si.

Nas figuras 29, 31 e 32 os dados de XRF são apresentados na forma de perfis geoquímicos, obtidos ao plotar as diferentes concentrações dos elementos em função das profundidades de cada amostra analisada.

O formato de perfil permite que enriquecimentos, depleções e tendências geoquímicas significativas sejam facilmente reconhecidas, a partir das quais um zoneamento quimioestratigráfico pode ser identificado. Além disso, permite-se a correlação dos dados geoquímicos com os dados dos perfis geofísicos dos poços, facilitando e enriquecendo as interpretações.

Perfis geoquímicos com base em razões elementares, juntamente com os perfis geofísicos dos poços estão representados nas figuras 33 e 34, sendo utilizadas na separação de quimiofácies e posteriormente na correlação entre os poços estudados (figura 35).

6.4 Delimitação e Caracterização do Diabásio

No poço 3-PGN-5-MA, fica bastante clara a presença de uma grande rocha intrusiva, caracterizada pela soleira de diabásio, facilmente identificada através dos perfis geofísicos e confirmadas pelos perfis químicos resultantes da análise de XRF.

Através de curvas nos tracks 6, 7 e 8, em que foram plotados juntas curvas de Al e K, Fe e Si e Fe e K, respectivamente, é possível identificar crossovers na porção intrusiva, sendo fortes marcadores dessa mudança de litologia baseada na mudança brusca de composição química das rochas. Esses crossovers ocorrem quando o K e o Si que nas rochas sedimentares das porções Poti e Poti2 tem suas curvas à direita das de Fe e Al e se cruzam quando adentram no intervalo do diabásio, pois as rochas sedimentares possuem maior abundância de quartzo e álcali-feldspatos (ricos em Si e K, respectivamente), enquanto os diabásios são caracterizados pela presença de piroxênios e Ca-plagioclásios (ricos em Fe e Al, respectivamente). Assim foi possível separar a porção de diabásio em três diferentes fácies, denominadas DB1, DB2 e DB3.

DB1: Bastante rica em Magnésio (Mg) e em Cálcio (Ca), provavelmente relacionada ao enriquecimento em olivinas e plagioclásio cálcico na parte basal das intrusões. Baixíssimo valor de raios gama e altíssima resistividade, além do afastamento das curvas de densidade e neutrão e baixo valor de tempo de trânsito.

DB2: Caracterizada por valores um pouco mais altos de raios gama, tendo uma feição “barriguda” no primeiro terço superior da soleira. Essa feição estaria relacionada a rápida cristalização nas bordas da intrusão em contraste com a percolação ascendente dos voláteis devido ao resfriamento mais lento em seu interior (Martins, 1991 apud Trosdtorf et al., 2018). Menor concentração de Magnésio (Mg) e Cálcio (Ca) e aumento no teor de Potássio (K), ligado possivelmente à presença de plagioclásios mais sódicos. Os valores de resistividade se mantêm bem altos, assim como a curva do sônico, seguindo um trend uniforme ao longo de toda a intrusão e as curvas de densidade e neutrão se mantêm afastadas, se aproximando um pouco conforme há um aumento dos valores de raios gama.

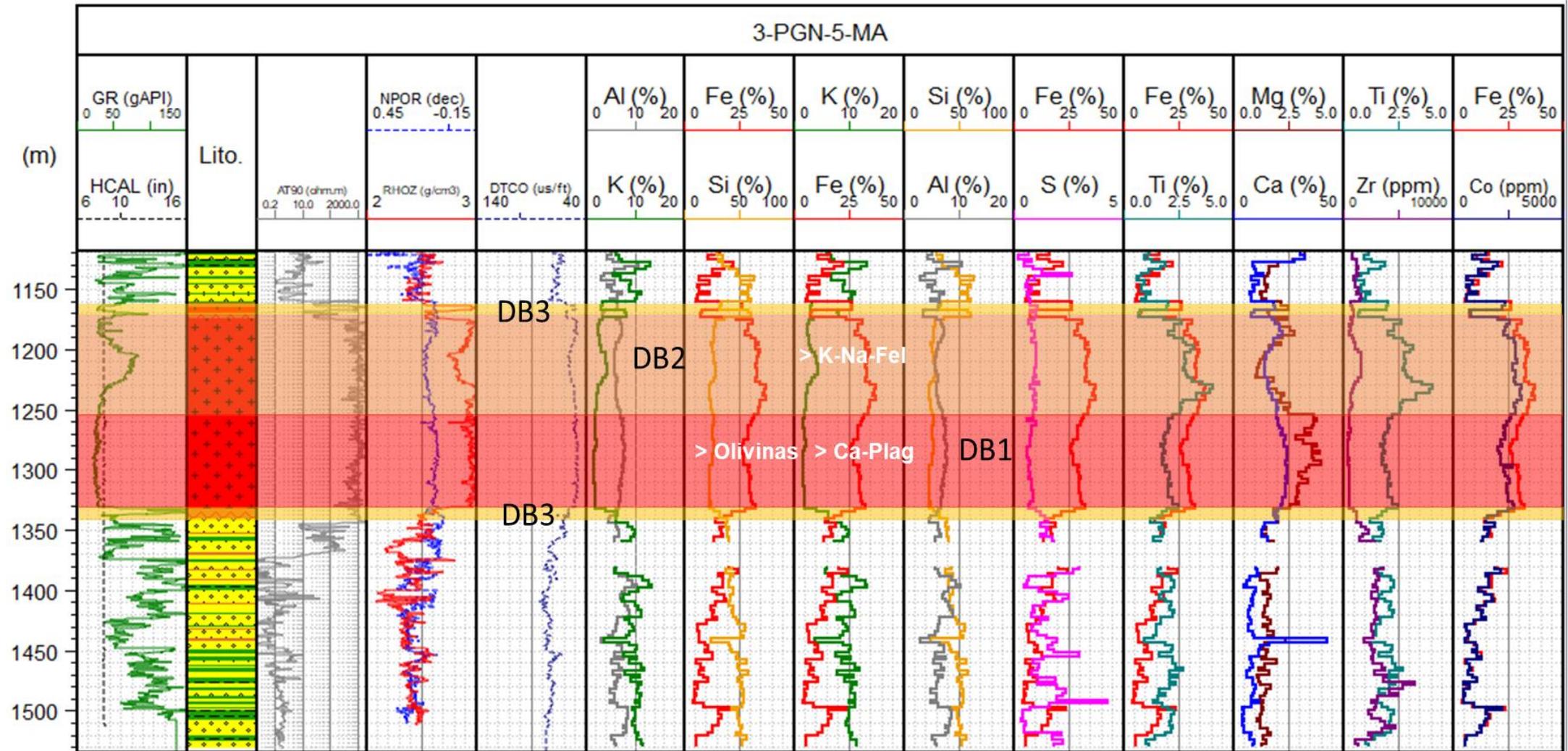


Figura 29: Classificação da Intrusão Ígnea no poço 3-PGN-5-MA em 3 quimiofácies, DB1, DB2 e DB3, de acordo com a variação das curvas geoquímicas.

DB3: Mudança transicional de comportamento das curvas podendo estar relacionada a uma zona de metamorfismo de contato, na base e no topo da intrusão.

A questão da parte basal do diabásio conter maiores teores de Ca e Mg faz bastante sentido, visto que no processo de cristalização do magma, seguindo a Série de Bowen (Figura 30), na primeira fase de resfriamento são formados cristais de olivina, piroxênios e alguns plagioclásios cálcicos, que vão se acumulando na base da intrusão. Na parte mais superior da intrusiva, observa-se um decaimento nas curvas de Ca e Mg e aumento do K, associado à cristalização de plagioclásios mais sódicos, que contém maior proporção de K que os Ca-plagioclásios, sendo a forma de distinguir isso, pois a técnica de XRF empregada não fornece valores de sódio (Na).

Na parte superior da intrusiva há um enriquecimento de Fe podendo estar relacionado ao fato de que a olivina tem apenas Mg, enquanto os piroxênios e anfibólios possuem Fe e Mg, e são mais abundantes no topo da ígnea.



Figura 30: Séries de Reação de Bowen. Fonte: Teixeira et al. (2000)

6.5 Caracterização dos Corpos Arenosos

Com base nas variações de curvas geoquímicas, os arenitos da porção Poti 2 do poço 3-PGN-5-MA puderam ser caracterizados em 6 diferentes fácies (Figura 31), KFEL, QTZ, PR, CIM, MP E ARG. Para tal caracterização, foram considerados os elementos Al, K, Fe, Si, S e Ca, que apresentam concentrações representadas em porcentagem (%) e os elementos traço Zr e Co, em partes por milhão (ppm).

As fácies identificadas nos arenitos da Formação Poti nesse poço puderam ser separadas da seguinte forma:

QTZ: arenitos mais quartzosos, devido a um aumento no teor de Si e uma queda no teor de Al e K.

KFEL: arenitos mais feldspato-potássicos, devido a uma diminuição no teor de Si e aumento no teor de Al e K.

PR: arenitos piritosos, devido ao aumento em conjunto dos teores de Fe e S, constituintes do mineral pirita (FeS_2).

CIM: arenitos cimentados por calcita, devido a um forte enriquecimento em Ca.

MP: arenitos com minerais pesados, relacionados ao aumento da concentração do elemento Zr, presente exclusivamente em minerais de zircão.

ARG: arenitos mais argilosos, ligados a altos valores de Fe e Co.

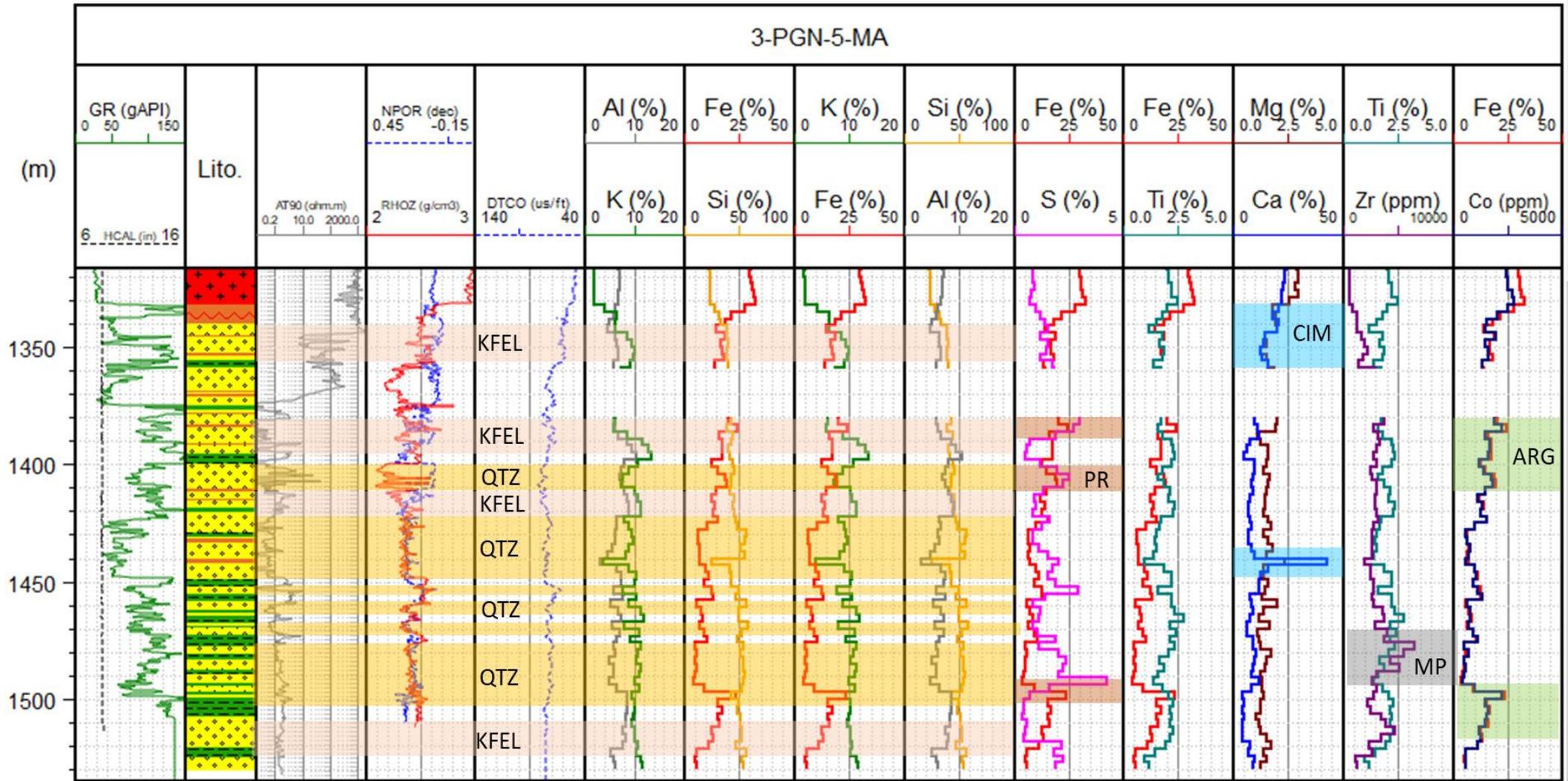


Figura 31: Classificação dos arenitos da Fm. Poti baseada nas variações dos perfis geoquímicos do poço 3-PGN-5-MA.

É possível notar, baseado nessa classificação, que a porção Poti 2 no poço 3-PGN-5-MA é caracterizada por um arenito mais feldspático na base, vai ficando mais quartzoso em direção ao topo e na parte superior, abaixo da intrusão ígnea, ocorrem algumas intercalações entre feldspático e quartzoso (figura 31).

Os valores de raios gama são mais baixos nos intervalos de arenitos mais quartzosos e mais altos nos intervalos cujos arenitos apresentam composição mais feldspática.

É importante destacar a ocorrência de duas zonas de suposta cimentação por calcita, devido ao aumento de cálcio nesses intervalos, uma mais próxima a porção de diabásio e outra no meio da porção Poti 2.

São observadas 3 zonas de piritização, baseadas no aumento nas curvas de Fe e S, sendo duas logo abaixo do reservatório de gás e um mais próximo da base.

As zonas de piritização estão relacionadas a um baixo valor de resistividade, mesmo em intervalos cujo *crossover* das curvas de RHOZ e NPOR indicaram a presença de gás (figura 31). A influência da pirita na avaliação petrofísica do poço 3-PGN-5-MA é bastante discutida no trabalho de Calonio (2020).

As curvas de Fe e Si possuem maior afastamento em intervalos de arenitos mais quartzosos. Os intervalos com maior teor de argilosidade estão relacionados ao aumento do teor de Fe e Co, que costumam ser incorporados juntos às argilas e ocorrem geralmente em conjunto com as fácies de arenitos mais feldspáticos.

No intervalo em que o corpo arenítico é caracterizado como rico em minerais pesados, a curva de Zr aumenta junto com o aporte detrítico, indicado pelo aumento na concentração de Ti.

Com base nas variações de curvas geoquímicas, os arenitos da porção Poti 2 do poço 1-OGX-110-MA puderam ser caracterizados em 7 diferentes fácies (figura 32), KFEL, NaFEL, QTZ, PR, CIM, MP E ARG.

Os elementos utilizados nessa caracterização também foram os elementos maiores e menores Al, K, Fe, Si, S e Ca, com concentrações representadas em porcentagem (%) e os elementos-traço Zr e Co, em partes por milhão (ppm).

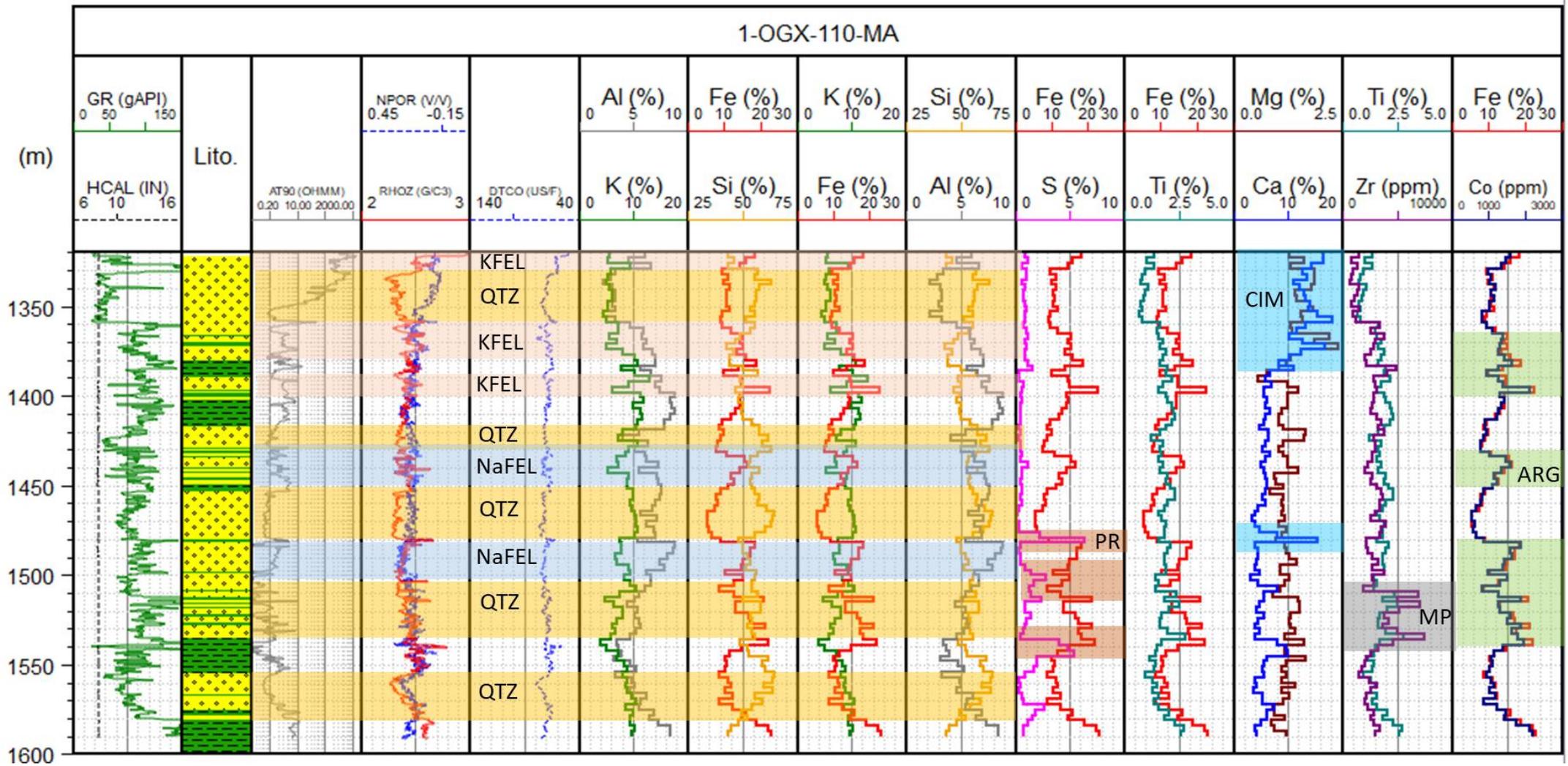


Figura 32: Classificação dos arenitos da Fm. Poti baseada nas variações dos perfis geoquímicos do poço 1-OGX-110-MA.

As fácies identificadas nos arenitos da Formação Poti nesse poço puderam ser caracterizadas da seguinte forma:

QTZ: arenitos mais quartzosos, devido a um aumento no teor de Si e uma queda no teor de Al e K.

KFEL: arenitos mais feldspato-potássicos, devido a uma diminuição no teor de Si e aumento no teor de Al e K.

NaFEL: arenitos cujo teor de Si diminui, o teor de Al aumenta, mas o teor de K não segue o mesmo trend do Al, podendo indicar um arenito mais rico em plagioclásios.

PR: arenitos piritosos, devido ao aumento em conjunto dos teores de Fe e S, constituintes do mineral pirita (FeS_2).

CIM: arenitos cimentados por calcita, devido a um forte enriquecimento em Ca.

MP: arenitos com minerais pesados, relacionados ao aumento da concentração do elemento Zr, presente exclusivamente em minerais de zircão.

ARG: arenitos mais argilosos, ligados a altos valores de Fe e Co.

É possível notar, baseado nessa classificação, que a porção Poti 2 no poço 1-OGX-110-MA é caracterizada por arenitos mais quartzosos na base, apresentando algumas intercalações entre quartzosos e feldspáticos mais sódicos na parte intermediária e intercalações entre arenitos mais quartzosos e mais feldspato-potássicos na parte superior.

Os valores de raios gama atingem valores mais baixos nos intervalos de arenitos mais quartzoso, um pouco mais altos nos intervalos cujos arenitos apresentam composição feldspática mais sódica e apresenta os valores mais altos de raios gamas nas zonas de composição feldspato-potássicas. Há uma exceção na penúltima face arenítica, onde os perfis geoquímicos indicam composição mais

quartzosa, mas apresenta valores mais altos de raios gama, podendo estar relacionado a forte intercalação de areias e argilas nessa parte.

Também é observada nesse poço a ocorrência de duas zonas de suposta cimentação por calcita, devido ao aumento de cálcio nesses intervalos, uma mais próxima a porção de diabásio e outra no meio da porção Poti 2.

São observadas 3 zonas de piritização, baseadas no aumento nas curvas de Fe e S, na parte mais basal da formação. Entretanto, no intervalo da parte superior, cujo crossover das curvas de RHOZ e NPOR indicam a presença de gás, não apresenta valores anômalos de resistividade como no poço 3-PGN-5-MA. Nessa zona de gás os valores de resistividade são maiores e não foi detectada presença de pirita através dos perfis geoquímicos.

As curvas de Fe e Si possuem maior afastamento na maior parte dos intervalos de arenitos mais quartzosos. Os intervalos com maior teor de argilidade estão relacionados ao aumento do teor de Fe e Co, que costumam ser incorporados juntos às argilas e ocorrem geralmente em conjunto com as fácies de arenitos mais feldspáticos.

Na zona em que o corpo arenítico é caracterizado como rico em minerais pesados, a curva de Zr aumenta representando o enriquecimento do mineral zircão naquela face arenítica, além do aumento na concentração de Ti, indicando aumento do aporte detrítico.

6.6 Proxies Geoquímicas

Diversas razões e relações elementares são abordadas na literatura e aplicadas não só na interpretação paleoambiental e paleodeposicional, mas em vários outros aspectos geológicos. Para este trabalho, foram utilizadas 8 razões como *proxies* geoquímicas, Si/Al, Si/Fe, K/Ca, Ti/Ca, V/(V+Ni), Y/P, Sr/Cu e Sr/Ca. Tais *proxies* serviram como possíveis indicadores de variação de argilidade, aporte, condições redox, fonte/proveniência, paleoclima e salinidade.

6.6.1 Argilosidade

As razões Si/Al e Si/Fe foram selecionadas nesse estudo para a avaliação de argilosidade. A razão Si/Al é amplamente utilizada e indica a relação quartzo/argilo-mineral de uma amostra, visto que as concentrações de Al estão relacionadas à quantidade de argila e as concentrações de Si estão relacionadas ao conteúdo de quartzo detrítico. Já a razão Si/Fe foi selecionada devido à boa correlação negativa entre esses dois elementos verificados na Análise de Componentes Principais (PCA) e pela relação do Fe e seu enriquecimento nas argilas.

6.6.2 Input Terrígeno

As razões Ti /Ca e Fe/Ca como proxies de fluxo terrígeno são baseadas na suposição de que os conteúdos de Ti e Fe dos sedimentos marinhos estão diretamente ligados aos sedimentos terrígenos (siliciclásticos) carregados principalmente ao oceano por processos de transporte fluvial e /ou eólico (Arz *et al.*, 1999; Nace *et al.*, 2014, *apud* Gebregiorgis, 2020), enquanto as intensidades de Ca refletem mudanças na produção de carbonato de cálcio (CaCO₃) pelo plâncton marinho (Bahr *et al.*, 2005, *apud* Gebregiorgis, 2020).

A concentração de K representa a abundância de minerais clásticos portadores de K provenientes de a erosão de sedimentos. Roy *et al.*, 2017 sugere que a razão K/Ca representa frações não carbonáticas inorgânicas (minerais de argila e óxidos) depositadas por erosão e essa variação na concentração de K seria um efeito da diluição do carbonato.

Para este trabalho, a razão Ti/Ca apresentou boa variação e foi selecionada para a análise de aporte continental, bem como a razão K/Ca devido a correlação negativa desses elementos identificada na Análise de Componentes Principais (PCA) e a forte presença do K em sedimentos terrígenos.

6.6.3 Condições Redox

Os estados de oxidação e redução são significativos para identificar a deposição de sedimentos em ambiente marinho ou não marinho. O aumento de alguns metais traço em sedimentos é direta ou indiretamente restringido por condições redox por meio de uma mudança no estado redox e/ou especiação (McKay et al., 2007, apud Madukwe, 2019). As razões U/Th, Ni/Co, Cu/Zn, (Cu + Mo)/Zn, V/Sc, V/(V+Ni) e V/Cr foram utilizadas para avaliar as condições paleoredox (Bjorlykke, 1974; Hallberg, 1976; Dypvik, 1984; Dill, 1986; Shaw *et al.*, 1990; Brumsack, 2006; Nagarajan *et al.*, 2007; Hetzel *et al.*, 2009, apud Madukwe, 2019),

A razão V/(V+Ni) apresentou melhores respostas a variações estratigráficas, sendo selecionada para análise das condições redox nesse trabalho.

6.6.4 Fonte/Proveniência

O elemento P pode estar concentrado tanto em minerais pesados contendo P (monazita, apatita) quanto em fosfato biogênico. Os elementos Zr e Y são altamente "imóveis", sendo quase exclusivamente concentrados em minerais pesados. O elemento Y também está contido em minerais como a apatita, monazita e xenotímio, enquanto o elemento Zr é praticamente exclusivo de zircões detríticos. Dessa forma, as razões Y/P e Zr/P podem indicar mudanças na fonte/proveniência dos sedimentos (Craigie, 2016).

A razão Y/P se mostrou mais sensível às variações, sendo, portanto, selecionada para a identificação de superfícies estratigráficas. Por possivelmente representar mudanças na proveniência/fonte dos sedimentos, foi utilizada como *proxy* de aporte sedimentar nesse trabalho.

6.6.5 Paleoclima

O elemento gálio (Ga) está presente principalmente em minerais de argila, especialmente caulinita, refletindo as condições climáticas quentes e úmidas (Roy, 2013, Beckmann, 2005 apud Han, 2020). O rubídio (Rb) está intimamente relacionado com a illita, refletindo as condições climáticas frias e áridas (Roy, 2013 apud Han, 2020). Quanto mais frio e seco for o clima no momento da deposição, menor será a razão Ga/Rb na rocha sedimentar.

O clima tem efeito extremo na mineralogia e geoquímica dos sedimentos (Rieu *et al.*, 2007; Yan *et al.*, 2010 *apud* Sarki Yandoka, 2015). O intemperismo está relacionado ao clima. O intemperismo intenso (especialmente químico) está associado a climas quentes e úmidos, enquanto o intemperismo mínimo está associado ao clima frio e árido (Nesbitt *et al.*, 1996 *apud* Sarki Yandoka 2015). A razão Estrôncio (Sr) / Cobre (Cu) é um indicador elementar importante para condições paleoclimáticas (Lerman, 1989; Wang *et al.*, 1997 *apud* Sarki Yandoka, 2015)

Embora as concentrações de Sr e Cu sejam influenciadas pela escala de uma bacia deposicional e pela profundidade da água (Jia *et al.*, 2013), geralmente altas razões Sr/Cu são sugeridas para refletir um clima frio e seco e baixas razões Sr/Cu indicam um clima quente e úmido (Lerman, 1989 *apud* Sarki Yandoka)

Entre as razões Ga/Rb e Sr/Cu, a razão Sr/Cu apresentou melhores respostas às mudanças quimioestratigráficas, sendo selecionada para análise de paleoclima no presente estudo.

6.6.6 Salinidade

A razão Sr/Ca pode indicar variações no teor de salinidade. A proporção entre Sr e Ca pode ser usada como uma medida de salinidade dentro de lagos, mas é difícil determinar a proporção adequada desses elementos necessários para começar a substituir Ca por Sr em virtude de aumentos na salinidade do lago. Empiricamente, segundo estudos, o relacionamento parece particularmente forte. Estima-se que parte do estrôncio seja derivada de fontes clásticas que entram nos lagos através do transporte eólico com os outros principais elementos detríticos. Devido à forte correlação entre esses dois elementos é provável que grande parte do estrôncio preservado nos sedimentos dos lagos está presente na fração carbonática (Rush, 2010 *apud* Ribeiro, 2019)

Em ambientes lagunares, à medida que a salinidade no lago aumenta, a quantidade de estrôncio precipitado e preservado nos carbonatos do sedimento também aumenta. Dessa forma, a razão Sr/Ca pode ser usada empiricamente como uma medida da salinidade do lago através do tempo (Bahr, 2008 *apud* Ribeiro, 2019).

Sr e Ba são dois elementos considerados indicadores de paleosalinidade (Liu, 1980; Liu *et al.*, 1984; Deng e Qian, 1993; Wang, 1996, *apud* Sarki Yandoka, 2015). Uma alta proporção de Sr/Ba reflete alta salinidade, e uma baixa proporção, baixa salinidade. (Deng & Qian, 1993 *apud* Sarki Yandoka, 2015)

Contudo, o elemento Ba está relacionado à baritina no poço, composto muitas vezes utilizado para adensar o fluido de perfuração e pode estar presente como contaminante nas amostras de calha analisadas. Por conta disso, optou-se por não usar a razão Sr/Ba e a análise de salinidade foi baseada na variação da razão Sr/Ca.

6.7 Interpretação Paleoambiental e Paleodeposicional

Na figura 33, o perfil litológico foi plotado junto com os perfis geofísicos do poço e com perfis geoquímicos das razões elementares Si/Al, Si/Fe, K/Ca, Ti/Ca, V/(V+Ni), Y/P, Sr/Cu e Sr/Ca.

A partir da variação comportamental das razões estudadas, foi possível observar diversas superfícies estratigráficas, representadas por bruscas mudanças de tendência da base para o topo. Com base nessas variações, a porção Poti 2 do poço 3-PGN-5-MA foi dividida em 5 diferentes quimiofacies, PT-A, PT-B, PT-C, PT-D e PT-E.

PT-A: Argilosidade mais baixa (Si/Al e Si/Fe) e aporte agradacional para o topo (Ti/Ca, K/Ca e Y/P), Clima menos seco e frio (Sr/Cu), mais oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) para o topo.

PT-B: Diminuição da argilosidade para o topo (Si/Al). O aporte parece diminuir gradativamente para o topo (Ti/Ca, K/Ca e Y/P); Clima levemente mais seco e frio (Sr/Cu), menos oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) para o topo.

PT-C: Diminuição da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial máximo na parte superior da unidade (Si/Fe). O aporte parece ser progradacional (Ti/Ca, K/Ca e Y/P) para o topo; Clima menos seco e frio (Sr/Cu), um pouco mais oxigenado (V/(V+Ni)) e mais salino (Sr/Ca) para o topo.

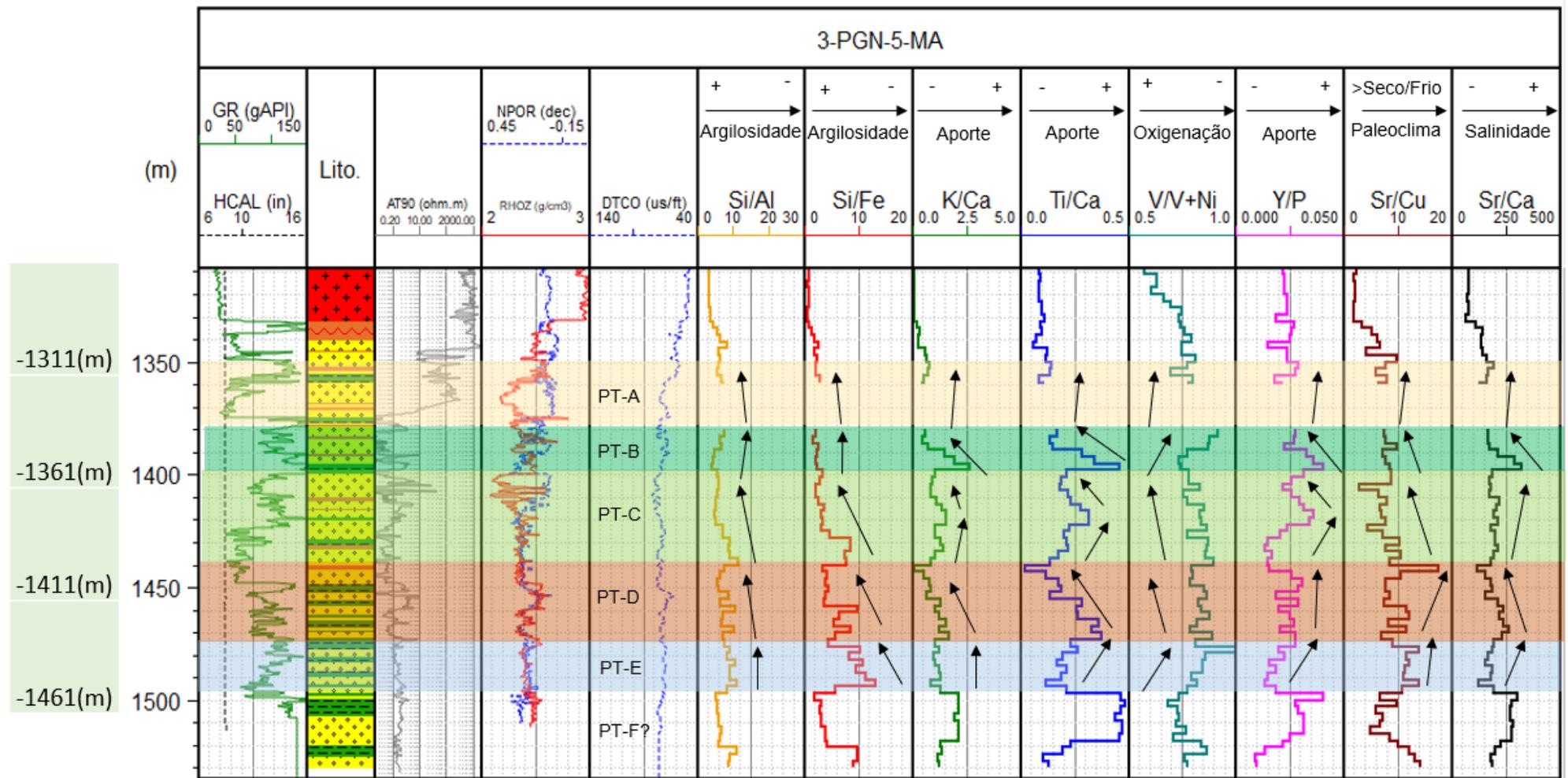


Figura 33: Quimiofácies PT-A, PT-B, PT-C, PT-D e PT-E da Fm. Poti no poço 3-PGN-5-MA.

PT-D: Aumento gradativo da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial máximo na parte superior da unidade (Si/Fe). O aporte parece diminuir (Ti/Ca e K/Ca para o topo; Clima um pouco menos seco e frio (Sr/Cu), um pouco mais oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) em direção ao topo.

PT-E: Diminuição gradativa da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial mínimo na parte inferior da unidade (Si/Fe). O aporte parece ser agradacional (K/Ca) a progradacional (Ti/Ca e Y/P) para o topo; Clima mais seco e frio (Sr/Cu), menos oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) em direção ao topo.

Seguindo o mesmo padrão para o poço 1-OGX-110-MA, foram plotados no gráfico da figura 34 o perfil litológico junto com os perfis geofísicos e com perfis geoquímicos das razões elementares Si/Al, Si/Fe, K/Ca, Ti/Ca, V/(V+Ni), Y/P, Sr/Cu e Sr/Ca.

A partir da variação comportamental das razões estudadas, também foi possível observar diversas superfícies estratigráficas, representadas por bruscas mudanças de tendência da base para o topo. Com base nessas variações, a porção Poti 2 do poço 1-OGX-110-MA foi dividida em 6 diferentes quimiofacies, PT-A, PT-B, PT-C, PT-D, PT-E e PT-F, sendo as 5 primeiras comuns as camadas observadas no poço 3-PGN-5-MA e uma PT-F adicional.

PT-A: Diminuição da argilosidade para o topo (Si/Al), com potencial máximo no meio da unidade (Si/Fe). O aporte diminui para o topo (Ti/Ca, K/Ca e Y/P), Clima menos seco e frio (Sr/Cu), mais oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) para o topo.

PT-B: Diminuição da argilosidade para o topo (Si/Al), com potencial máximo na parte inferior da unidade (Si/Fe). O aporte parece diminuir gradativamente para o topo (Ti/Ca, K/Ca e Y/P); Clima menos seco e frio (Sr/Cu), menos oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) para o topo.

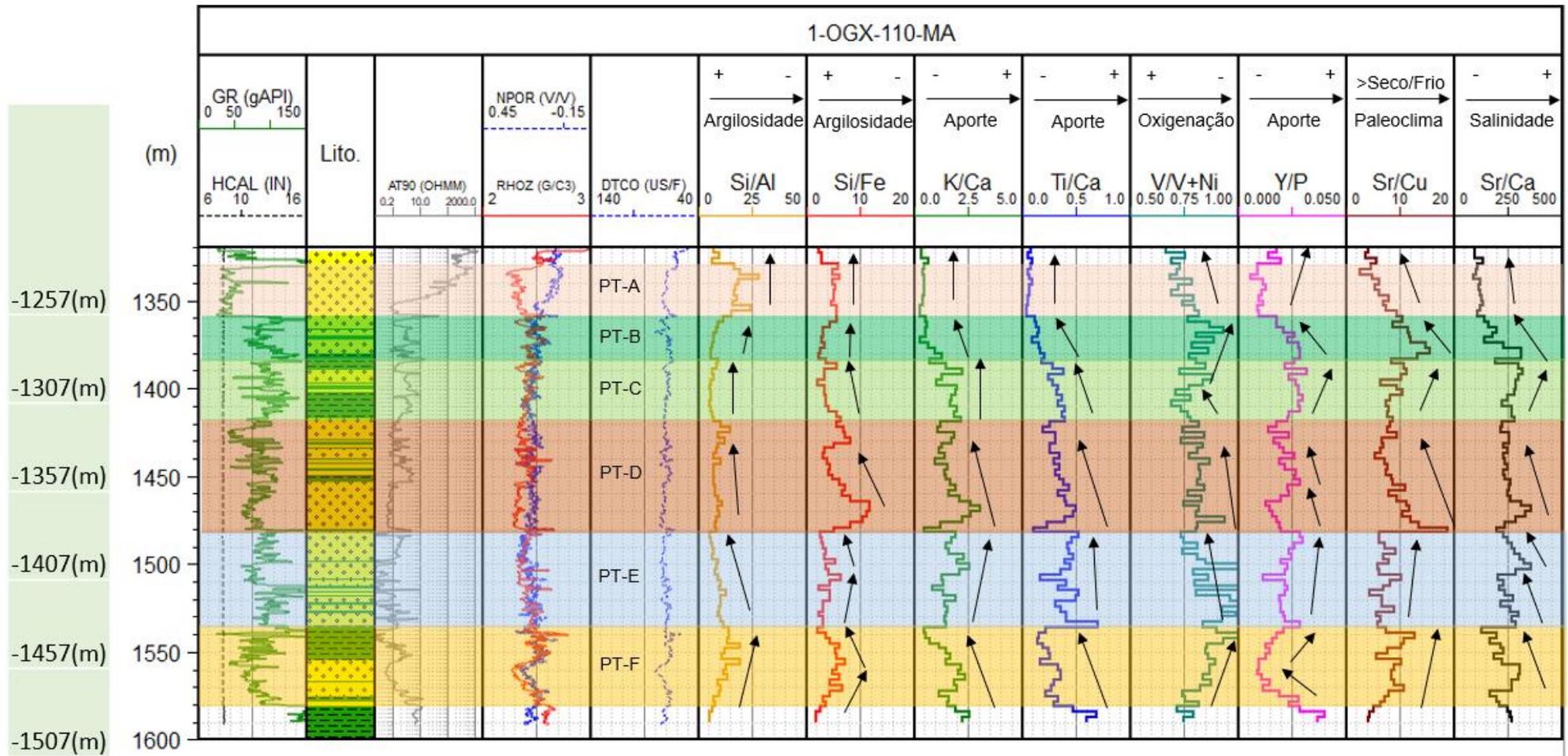


Figura 34: Quimiofácies PT-A, PT-B, PT-C, PT-D, PT-E e PT-F da Fm. Poti no poço 1-OGX-110-MA.

PT-C: Aumento gradativo da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial máximo no meio da unidade (Si/Fe). O aporte parece apresentar um padrão agradacional (Ti/Ca, K/Ca e Y/P) para o topo; Clima mais seco e frio (Sr/Cu), um pouco menos oxigenado (V/(V+Ni)) e mais salino (Sr/Ca) para o topo.

PT-D: Diminuição gradativa da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial mínimo na parte inferior da unidade (Si/Fe). O aporte apresenta padrão agradacional (Ti/Ca) a levemente progradacional (K/Ca e Y/P) para o topo; Clima um pouco mais seco e frio (Sr/Cu), um pouco mais oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) em direção ao topo, parecendo haver uma leve oscilação no meio da unidade.

PT-E: Aumento gradativo da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial máximo no meio da unidade (Si/Fe). O aporte apresenta padrão agradacional (Ti/Ca) a levemente progradacional (K/Ca e Y/P) para o topo; Clima levemente menos seco e frio (Sr/Cu), um pouco mais oxigenado (V/(V+Ni)) e mais salino (Sr/Ca) em direção ao topo, parecendo haver uma leve oscilação no meio da unidade.

PT-F: Diminuição gradativa da argilosidade para o topo (Si/Al), com um potencial mínimo no meio da unidade (Si/Fe), apesar de uma gradativa diminuição do aporte continental para o topo (K/Ca, Ti/Ca); Clima mais seco e frio (Sr/Cu), menos oxigenado (V/(V+Ni)) e menos salino (Sr/Ca) em direção ao topo.

A partir das variações observados nos perfis, nota-se que existem ciclos de padrões progradacionais e retrogradacionais em ambos os poços, marcados pelas variações no aporte siliciclástico aqui indicados na curva Ti/Ca. As idas e vindas na curva de aporte indicam a existência de um sistema bastante dinâmico, podendo estar relacionado ao sistema deltaico com retrabalhamento por ondas e marés pelo qual a Formação Poti é caracterizada por Góes (1995).

Investigações paleoclimáticas representam um aspecto importante nas análises paleoambientais, visto que o clima afeta a ação do intemperismo das rochas, a taxa de sedimentação, transporte e composição e até mesmo o grau de enriquecimento de matéria orgânica. Condições ambientais mais úmidas estão muitas vezes relacionadas a diminuição no teor de K.

Os perfis geoquímicos aqui analisados apresentam uma correlação bastante interessante quanto a variação das curvas de Sr/Cu e K/Ca. Quando a razão Sr/Cu diminui, indicando um clima mais quente e úmido, a razão K/Ca diminui, devido a depleção do K em detrimento do Ca.

As variações na razão Y/P em ambos os poços marcam bem as mudanças na proveniência/fonte dos sedimentos e se correlacionam bastante com os ciclos de padrões progracionais do aporte sedimentar.

6.8 Correlação Químioestratigráfica dos Poços

Por fim, apesar da necessidade de algumas correções de profundidade em relação aos diferentes tempos de retorno das amostras de calha em cada poço, o presente estudo traz uma proposta de correlação químioestratigráfica inicial, que pode ser observada na figura 35.

Os poços 1-OGX-110-MA e 3-PGN-5-MA foram correlacionados com base nas variações das razões elementares e na caracterização das unidades químioestratigráficas presentes nos dois poços.

De uma maneira geral e preliminar, é possível inferir que a camada PT-F é caracterizada por um paleoambiente deposicional mais seco e frio, menos oxigenado e salino no poço 1-OGX-110-MA, mas não está presente, ou não foi amostrada no poço 3-PGN-5-MA.

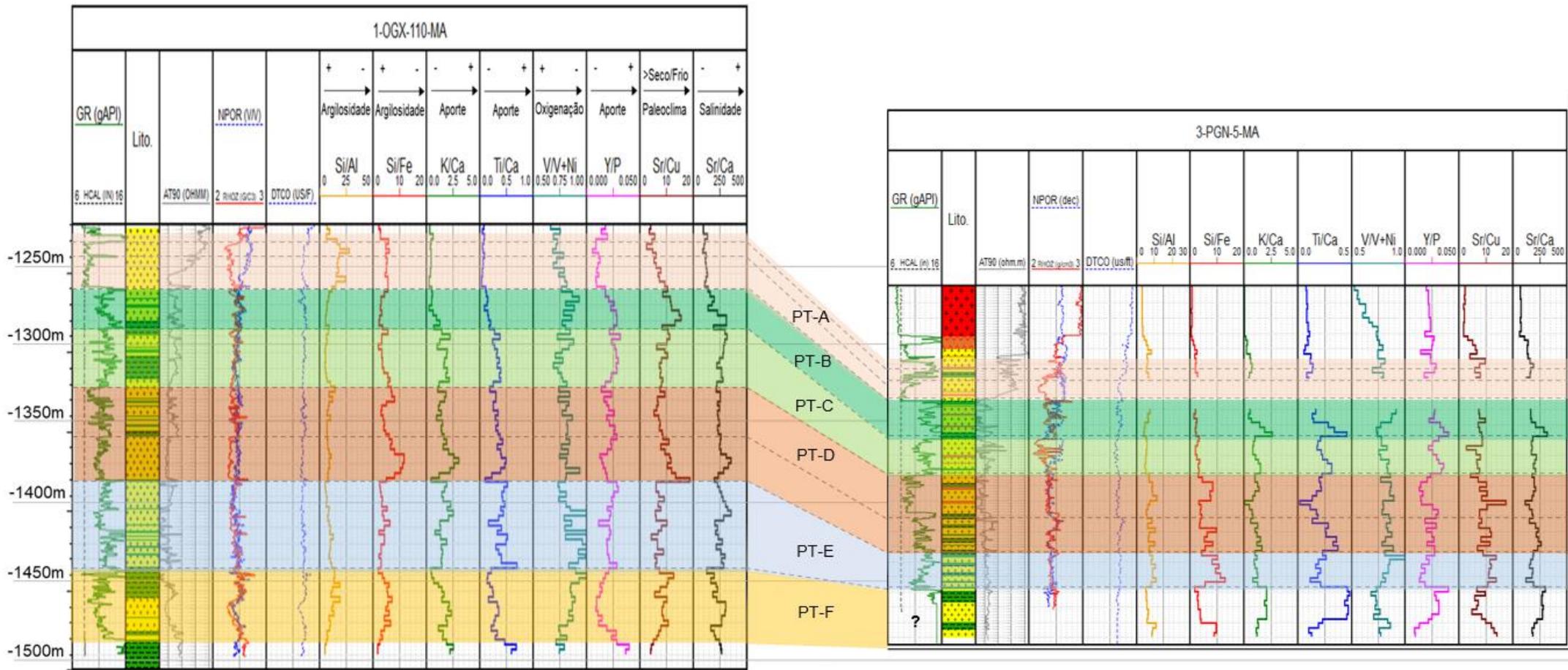


Figura 35: Correlação da Fm. Poti nos poços 1-OGX-110-MA e 3-PGN-5-MA.

A camada PT-E é a que mais difere de um poço para outro. Quanto ao aporte, ambos os poços apresentam padrão agradacional/progradacional para o topo, mas enquanto a argilosidade aumenta gradativamente no 1-OGX-110-MA, no 3-PGN-5-MA se observada uma leve diminuição. Além disso, na camada PT-E do poço 1-OGX-110-MA as condições climáticas parecem um pouco mais úmidas e quentes, mais oxigenadas e mais salinas, enquanto no 3-PGN-5-MA as proxies indicam clima mais seco e frio, menos oxigenado e menos salino.

Na camada PT-D, ambos os poços apresentam um aumento na argilosidade no meio cada camada, sendo um pouco mais abrupto esse aumento no 3-PGN-5-MA e no 1-OGX-110-MA ocorre de forma mais gradual. Enquanto o 1-OGX-110-MA apresenta um aporte de padrão agradacional/levemente progradacional para o topo, no 3-PGN-5-MA esse aporte diminui. Quanto ao paleoclima, no 1-OGX-110-MA é um pouco mais seco e frio, um pouco mais oxigenado e menos salino em direção ao topo, apresentando uma leve oscilação no meio da unidade, já no 3-PGN-5-MA também é um pouco mais oxigenado e menos salino, mas é pouco menos seco e frio.

Em relação a camada PT-C, no poço 1-OGX-110-MA ocorre aumento gradativo da argilosidade para o topo e aporte agradacional, enquanto no 3-PGN-5-MA essa argilosidade diminui e o padrão de preenchimento é progradacional em direção ao topo da unidade. O clima é mais seco e frio, um pouco menos oxigenado e mais salino no 1-OGX-110-MA, e é menos seco e frio, um pouco mais oxigenado e mais salino no 3-PGN-5-MA.

Em ambos os poços, a camada PT-B indica uma diminuição da argilosidade e do aporte para o topo. Clima menos seco e frio (Sr/Cu), menos oxigenado ($V/(V+Ni)$) e menos salino (Sr/Ca) para o topo. O clima é, em geral, menos seco e frio, menos oxigenado e menos salino tanto no PGX-110 quanto no 3-PGN-5-MA.

Já a camada PT-A é bem parecida nos dois poços, apresentando baixa argilosidade, menos aporte, clima menos seco e frio, mais oxigenado e menos salino para o topo.

7. CONCLUSÕES

A integração dos dados geoquímicos de XRF e dos perfis geofísicos a poço aberto permitiu a identificação de diferenças na composição dos arenitos deltaicos da Formação Poti, caracterizando-os em arenitos quartzosos, feldspáticos, piritosos, cimentados, argilosos e/ou enriquecidos em minerais pesados com base nas variações dos elementos Al, K, Fe, Si, S, Ca, Zr e Co nos poços 3-PGN-5-MA e 1-OGX-110-MA.

Foi possível realizar uma interpretação paleoambiental e paleodeposicional preliminar por meio das *proxies* geoquímicas Si/Al, Si/Fe, K/Ca, Ti/Ca, V/(V+Ni), Y/P, Sr/Cu e Sr/Ca, inferindo possíveis condições vigentes durante os processos deposicionais e diagenéticos da Fm. Poti nos poços estudados, tais como argilosidade, aporte, condições redox, paleoclima e salinidade.

Foram identificadas seis unidades quimioestratigráficas, cinco delas comuns aos dois poços, PT-A, PT-B, PT-C, PT-D e PT-E e uma unidade PT-F que só aparece ou pelo menos só foi amostrada no poço 1-OGX-110-MA, sendo caracterizada por um paleoambiente deposicional mais seco e frio, menos oxigenado e salino.

Ambos os poços apresentam na camada PT-E um aporte de padrão agradacional/progradacional para o topo com aumento gradual da argilosidade para o topo no 1-OGX-110-MA e uma leve diminuição no 3-PGN-5-MA. Além disso, na camada PT-E do 1-OGX-110-MA o paleoambiente parece um pouco mais úmido e quente, mais oxigenado e mais salino, enquanto no 3-PGN-5-MA as *proxies* indicam clima mais seco e frio, menos oxigenado e menos salino.

Na camada PT-D, ambos os poços apresentam um aumento na argilosidade no meio cada camada, sendo um pouco mais abrupto no 3-PGN-5-MA e mais gradual no 1-OGX-110-MA e enquanto o 1-OGX-110-MA apresenta um aporte de padrão agradacional/levemente progradacional para o topo, no 3-PGN-5-MA esse aporte diminui. Quanto ao paleoclima, no 1-OGX-110-MA é um pouco mais seco e frio, um pouco mais oxigenado e menos salino em direção ao topo, apresentando uma leve oscilação no meio da unidade, já no 3-PGN-5-MA também é um pouco mais oxigenado e menos salino, mas é um pouco menos seco e frio.

Em relação a camada PT-C, no poço 1-OGX-110-MA ocorre aumento gradativo da argilosidade para o topo e aporte de padrão agradacional, enquanto no 3-PGN-5-MA essa argilosidade diminui e o aporte é de padrão progradacional em direção ao topo da unidade. O clima é mais seco e frio, um pouco menos oxigenado e mais salino no 1-OGX-110-MA, e é menos seco e frio, um pouco mais oxigenado e mais salino no 3-PGN-5-MA.

Em ambos os poços, a camada PT-B indica uma diminuição da argilosidade e do aporte, clima menos seco e frio, menos oxigenado e menos salino para o topo, já a camada PT-A indica baixa argilosidade, menos aporte, clima menos seco e frio, mais oxigenado e menos salino para o topo.

Além disso, foram identificados parâmetros geoquímicos que podem ser indicadores de intrusões ígneas, através da relação de *crossovers* entre as curvas Al x K, Fe x Si, K x Fe, Si x Al, Fe x S e Fe x Ti.

A partir da aplicação desta metodologia de trabalho fácil, rápida, eficaz e de baixo custo operacional, foi possível gerar uma enorme quantidade de dados e identificar algumas das diversas possíveis aplicações desta técnica no estudo de amostras de calha, bem como contribuir para o melhor entendimento e zoneamento estratigráfico de reservatórios na Fm. Poti.

8. REFERÊNCIAS

ADACHI, M., YAMAMOTO, K., SUGISAKI, R., 1986. **Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: their geological significance as indication of ocean ridge activity.** *Sedimentary Geology*. 47(1-2), 125-148

AGUIAR, G. A. **Revisão geológica da bacia paleozoica do Maranhão.** Congresso Brasileiro de Geologia, 25., 1971, São Paulo. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1971. v. 3, p.113-122.

ALGEO, T.J., TRIBOVILLARD, N., 2009. **Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum–uranium covariation.** *Chemical Geology*. 268(3-4), 0-225.

ARAÚJO, D. B., FERREIRA, A. L. **Sumário geológico e setores em oferta.** Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). R15 (2017)

ASSIS, P.H. **Métodos de investigações aplicados em obras de construções de barragens: Investigações geológico-geotécnicas para barragens.** *Revista do CEDS (ISSN2447-0112)*, São Luís, n. 9, ago./dez., 2018.

BAIYEGUNHI, C., LIU K., GWAVAVA O. **Geochemistry of sandstones and shales from the Ecca Group, Karoo Supergroup, in the Eastern Cape Province of South Africa: Implications for provenance, weathering and tectonic setting.** *De Gruyter Open. Open Geosci.* 2017; 9:340–360

BENÍCIO, D. **Camada de valência.** Todo Estudo.

Disponível em:

<https://www.todoestudo.com.br/quimica/camada-de-valencia>.

Acesso em: 24 de Mar. 2021

CALONIO, L. W. **Influência de pirita e argilominerais nos cálculos de saturação da Fm. Poti, Bacia do Parnaíba: um estudo de caso no poço 3-3-PGN-5-MA-MA.** 2020.159p. Dissertação (Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra). Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2020.

CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil.** 1984. 586 p. Thesis (Doctorate). University of Califórnia, Santa Bárbara, 1984.

CAPUTO, M. V., IANNUZZI, R.; FONSECA, V. M. M. **Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Parnaíba.** Phoenix, v. 81, p. 1-6, 2005.

CIOCCARI, G. M., MIZUSAKI, A. M. P. **Sistemas Petrolíferos Atípicos nas Bacias Paleozoicas Brasileiras – Uma Revisão.** Revista Geociências. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 38, n. 2, p. 367 - 390, 2019

CRAIGIE, N. (2015). **Applications of chemostratigraphy in Middle Jurassic unconventional reservoirs in Eastern Saudi Arabia.** GeoArabia. 20. 79-110.

CRAIGIE, N. (2016). **Chemostratigraphy of the Silurian Qusaiba Member, Eastern Saudi Arabia.** Journal of African Earth Sciences, Volume 113, 2016, P. 12-34

CUNHA, F.M.B. **Evolução Paleozoica da Bacia do Parnaíba e Seu Arcabouço Tectônico.** 1986. Dissertação de Mestrado., IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DELLA FÁVERA, J. C. **Tempestitos na Bacia do Parnaíba.** 1990. 560 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

DINO, R.; ANTONIOLI, L.; BRAZ, S. M. N. **Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil.** Revista Brasileira de Paleontologia, São Leopoldo, n. 3, p. 24-35, jan./ jun. 2002.

EAGLE, M., PAYTAN, A., ARRIGO, K. R., VAN DIJKEN, G. L., MURRAY, R. W., 2003. **A comparison between excess barium and barite as indicators of carbon export**. *Paleoceanography*. 18(1).

FRITZSCHE, H., PHILLIPS, M. 2020. **Electromagnetic radiation**. *Encyclopedia Britannica*.

Disponível em:

<https://www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation>.

Acesso em 12 abr. 2021

GEBREGIORGIS, D., GIOSAN, L., HATHORNE, E. C., ANAND, P., NILSSON-KERR K., PLASS, A., LÜCKGE, A, CLEMENS, S. C., FRANK, M. (2020). **What can we learn from X-ray fluorescence core scanning data? A paleomonsoon case study**. *Geochmestry, Geophysics, Geosystems*, 21. Jan, 2020.

GEZEERI, T., HAMIM, A., ZEREIK, R., HUGHES, S., SCHEIBE, C. **High-Resolution Chemostratigraphy Application in Carbonates. A case study in the Cretaceous Mishrif reservoir, Minagish Field, Kuwait**. *International Petroleum Technology Conference*, Doha, Qatar, 2009

GÓES, A. M. **A formação Poti (carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba**. 1995. 172 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. **Bacia do Parnaíba**. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-68, jan./mar. 1994.

HAN, S.; ZHANG, Y.; HUANG, J.; RUI, Y.; TANG, Z. **Elemental Geochemical Characterization of Sedimentary Conditions and Organic Matter Enrichment for Lower Cambrian Shale Formations in Northern Guizhou, South China**. *Minerals*, 2020, 10, 793.

HE, C., JI, L., WU, Y., SU, A., ZHANG, M., 2016. **Characteristics of Hydrothermal Sedimentation Process in the Yanchang Formation, South Ordos Basin, China: Evidence from Element Geochemistry**. *Sedimentary Geology*. 345, 33-41.

JIAO, W., YANG, H., ZHAO, Y., ZHANG, H., ZHOU, Y., ZHANG, J., XIE, Q. **Application of trace elements in the study of oil-source correlation and hydrocarbon migration in the Tarim Basin, China.** Energy Exploration & Exploitation. Volume 28 · Number 6 · 2010 pp. 451-466.

LI, D., LI, R., ZHU, Z. *et al.* **Elemental characteristics and paleoenvironment reconstruction: a case study of the Triassic lacustrine Zhangjiatan oil shale, southern Ordos Basin, China.** *Acta Geochim* 37, 134–150 (2017).

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética: relatório final da etapa III.** Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1978. 212 p.

LOBATO, G. **Análise estratigráfica de alta resolução no intervalo do limite formacional Longá/Poti (Neodevoniano/ Eocarbonífero) em testemunhos de sondagem da bacia do Parnaíba.** Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, jan. 2007

LOPEZ, P., NAVARRO, E., MARCÉ, R., ORDONEZ, J., CAPUTO, L., ARMENGOL, J. (2006). **Elemental Ratios in sediments as indicators of ecological processes in Spanish reservoirs.** *Limnetica*. 25. 499-512.

MADUKWE, H. Y. **Paleoweathering, Paleoenvironment And Paleoclimate Of The Nanka Sandstone, Anambra Basin, Nigeria.** 2019. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, Volume 68, December 2019, pp. 25 – 36

MALVERN PANALYTICAL, 2021. **Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF).**

Disponível em:

<https://www.malvernpanalytical.com/br/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence>.

Acesso em: 12 abr. 2021.

MELO, D. P. **Quimioestratigrafia dos sedimentos de mar profundo no Oceano Pacífico Equatorial: uma abordagem quantitativa com ênfase em métodos de classificação.** Niterói, 2010. 208 p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha). Universidade Federal Fluminense, 2010.

MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S.; STREEL, M. 1998. **Latest devonian to early late carboniferous biostratigraphy of Northern Brazil: an update.** Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production, Pau, v. 22, n. 1, p. 13-33, 1998.

MENDES, M.S. 2007. **Análise estratigráfica do intervalo formacional Grajaú–Codó (Aptiano) da bacia do Parnaíba, NE do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Geologia), Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MENESES, P. R. et al. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** [S.l.]: Universidade Federal de Brasília, 2012. 276 p.

MIRANDA, F. S. et al. **Atypical igneous-sedimentary petroleum systems of the Parnaíba Basin, Brazil: seismic, well logs and cores.** Geological Society, London, Special Publications, v. 472, n. 1, p. 341-360, 2018.

NOBRE, J. A. **Interpretação paleodeposicional das Formações Poti e Cabeças com base em dados gamaespectrais obtidos em amostras de calha de poço na área do Parque do Gaviões, Bacia do Parnaíba.** Universidade Federal Fluminense. 2019.

OYEDOTUN, T. D. T. (2018) **X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview**, Geology, Ecology, and Landscapes, 2:2, 148154, DOI: 10.1080/24749508.2018.1452459

PRUNDEANU, I.M, et al. **Elemental geochemistry of the Upper Cretaceous reservoir and surrounding formations applied in geosteering of horizontal wells, Lebăda Field – Western Black Sea.** Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles 76, 1 (2021).

RATCLIFFE, K., WRIGHT M. **Unconventional Methods For Unconventional Plays: Using Elemental Data To Understand Shale Resource Plays.** PESA News Resources, Feb/Mar (2012)

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.** 2019. 92 p. Dissertação (Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra). Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2019.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; ARAI, M. **A passagem aptiano-albiano na Bacia do Grajaú, MA.** In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p.101-117

ROY, P.D., TORRESCANO-VALLE, N., ISLEBE, G.A., GUTIÉRREZ-AYALA, L.V. (2017), **Late Holocene hydroclimate of the western Yucatan Peninsula (Mexico).** J. Quaternary Sci., 32: 1112-1120.

SANO, J. L., RATCLIFFE, K. T., SPAIN, D. R. 2013. **Chemostratigraphy of the Haynesville Shale**, in U. Hammes and J. Gale, eds., Geology of the Haynesville Gas Shale in East Texas and West Louisiana, U.S.A.: AAPG Memoir 105, p. 137–154.

SARKI YANDOKA, B. M., ABDULLAH, W. H., ABUBAKAR, M.B., HAKIMI, M. H., ADEGOKE, A. K. **Geochemical characterisation of Early Cretaceous lacustrine sediments of Bima Formation, Yola Sub-basin, Northern Benue Trough, NE Nigeria: Organic matter input, preservation, paleoenvironment and palaeoclimatic conditions.** Marine and Petroleum Geology, Volume 61, 2015, p. 82-94

SCHLOTZ, R. & UHLIG, S. **Introduction to X-Ray Fluorescence(XRF).** Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, West Germany, 2006.

SIAL, A. N., MCREATH, I. **Petrologia Ígnea – Os Fundamentos e as Ferramentas de Estudo**, Salvador, Bahia, 1984.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

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

TROSDTORF, I., NETO, J. M., SANTOS, S. F., PORTELA FILHO, C. V., OGLIO, T. D., GALVES, A. C. M., & SILVA, A. M. **Phanerozoic magmatism in the Parnaíba Basin: characterization of igneous bodies (well logs and 2D seismic sections), geometry, distribution and sill emplacement patterns.** Geological Society, London, Special Publications, v. 472, n. 1, p. 321-340, 2018.

UNICOMP, 2021. **Como o espectrômetro de fluorescência de raio X garante a restrição de substâncias perigosas.**

Disponível em:

<http://portuguese.unicompxray.com/news/how-x-ray-fluorescence-spectrometer-assure-the-restriction-of-hazardous-substances-41397.html>.

Acesso em 12 abr. 2021

VAZ P.T., REZENDE V.G.A.M., WANDERLEY F. J. R., TRAVASSOS W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. Rio de Janeiro, **Boletim de Geociências da Petrobras**, 15(2):253-263.

WEISSERT, H., JOACHIMSKI, M., SARNTHEIN, M. 2008. **Chemostratigraphy.** International Subcomission Stratigraphy, appendix Newsletter, vol 42, n. 3, p. 145-179.