



**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA**

**POS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEÂNOS E DA TERRA**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E  
GEOQUÍMICOS PARA CARACTERIZAR SOLEIRAS DE DIABÁSIO  
DA ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

**BRUNA MAIA IMBUZEIRO**

**Niterói – RJ**

**2023**

**BRUNA MAIA IMBUZEIRO**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS PARA  
CARACTERIZAR SOLEIRAS DE DIABÁSIO DA ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES,  
BACIA DO PARNAÍBA**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra do Departamento de Geografia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientadores:

Prof. PhD. Antonio Fernando Menezes Freire

D.Sc. Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares De Oliveira

Niterói – RJ

2023

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

I32i Imbuzeiro, Bruna Maia  
INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS  
PARA CARACTERIZAR SOLEIRAS DE DIABÁSIO DA ÁREA DO PARQUE DOS  
GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA / Bruna Maia Imbuzeiro. - 2023.  
123 f.

Orientador: Antonio Fernando Menezes Freire.  
Coorientador: Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares De  
Oliveira.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Instituto de Geociências, Niterói, 2023.

1. Petrofísica. 2. Fluorescência de raios-X. 3. Difração  
de raios-X. 4. Rochas ígneas. 5. Produção intelectual. I.  
Menezes Freire, Antonio Fernando, orientador. II. Vidal Cunha  
Santa Rosa Soares De Oliveira, Filipe, coorientador. III.  
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.  
IV. Título.

CDD - XXX

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS  
PARA CARACTERIZAR SOLEIRAS DE DIABÁSIO DA ÁREA DO PARQUE  
DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

BRUNA MAIA IMBUZEIRO

Banca examinadora:

---

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

---

Dr. Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares De Oliveira (Coorientador – PETROBRAS)

---

Dra. Natalia Famelli Pereira (Petrobras)

---

Dr. Roberto Salvador Francisco D'Ávila (Petrobras)

---

Prof. Dr. Victor Matheus Joaquim Salgado Campos (GGO/UFF)

Niterói – RJ

2023

## Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por abençoar o meu caminho e me permitir chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Lucia e Ricardo, e a minha irmã, Patrícia, pelo incessante suporte e incentivo, por acreditarem em mim e principalmente pelo amor que sempre me foi dado. Obrigada por tudo que fizeram e fazem por mim. Gostaria de agradecer também ao meu afilhado, Miguel, que mesmo sem saber, me deu força em vários momentos, ao demonstrar de maneira tão inocente e pura seu amor por mim. Ao meu cunhado, Sione, muito obrigada pela preocupação que sempre teve comigo e pelo seu bom humor, especialmente nos momentos de tensão.

Agradeço imensamente por ter tido a oportunidade de ser orientada pelo Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire e pelo D.Sc. Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares De Oliveira, que me proporcionaram tantos ensinamentos e contribuíram para minha evolução acadêmica e pessoal. Muito obrigada por terem conduzido este trabalho com tanta paciência e dedicação.

Aos membros da banca examinadora, Natalia Famelli Pereira, Roberto Salvador Francisco D'Ávila e Prof. Victor Matheus Joaquim Salgado Campos pelos comentários e avaliações que tanto enriqueceram este trabalho.

Aos amigos da UFF: Ana Paula, Bruna Silva, Bruno, Carlos, Filipe, Hugo, Jorge, Leo, Lídia, Luiza, Pedro Henrique e Thiago, que diretamente me ajudaram à concluir este trabalho e compartilharem os momentos

A Universidade Federal Fluminense por sua estrutura e recursos que me proporcionaram um ensino de qualidade. Também agradeço aos funcionários e servidores por se empenharem tanto para que a instituição de ensino funcione com excelência e por tornarem o ambiente acadêmico ainda mais acolhedor.

Aos meus amigos de vida, por sempre estarem comigo, torcerem por mim e por fazerem os momentos estressantes serem mais leves.

Agradeço a Parnaíba Gás Natural pela doação das amostras de calha à UFF e ao BDEP/ANP por ter cedido os dados de poço, possibilitando a realização deste trabalho. Agradeço a Geoactive pelas licenças acadêmicas do software Interactive Petrophysics e ao GIECAR pelo desenvolvimento do software Appy, utilizados para

interpretação dos dados.

Por último, deixo meu respeito e agradecimento a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, por toda a dedicação e empenho para nos transmitir tanto conhecimento.

## RESUMO

As rochas ígneas desempenham papéis fundamentais na formação e evolução de sistemas petrolíferos em diversas bacias no mundo, sendo a Bacia do Parnaíba marcada por soleiras e diques de diabásio, que contribuem como fonte térmica para geração de hidrocarboneto, trapa e selo para este sistema petrolífero, correspondendo às Formações Mosquito e Sardinha. Para entender melhor essas intrusões, foi proposta uma metodologia para identificar as intrusões ígneas, interpretar suas variações composicionais e propor uma forma de distinção entre as Formações Mosquito e Sardinha. Para isso foram utilizadas descrições detalhadas de amostras de calha, fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e perfis de poços, como Raios Gama (GR), Densidade (RHOZ) e Fator fotoelétrico (PEFZ) de oito poços exploratórios perfurados na principal área produtora de gás da Bacia do Parnaíba, o Parque dos Gaviões. As intrusões desses poços foram identificadas através da Feição de Igneabilidade e classificadas, com base na curva de GR, em feição “barriguda” ou feição “caixote”. A interpretação dos dados sugere que as intrusões de feição “caixote” se tratam de corpos ígneos sem variação composicional, enquanto as intrusões de feição “barriguda” evidenciam uma variação ao longo do poço, evidenciada por perfis de poço, composição química e mineralógica, relacionada a uma diferenciação magmática que respeita a Serie de Reações de Bowen.

**Palavras-chave:** Formação Mosquito; Formação Sardinha; Bacia do Parnaíba; Perfis de poços; Amostras de calha; Fluorescência de Raios- X; Difractometria de Raios-X

## ABSTRACT

Igneous rocks play fundamental roles in the formation and evolution of petroleum systems in various basins around the world. The Parnaíba Basin is characterized by diabase sills and dikes, which contribute as a thermal source for hydrocarbon generation, as well as providing a trap and seal for this petroleum system, corresponding to the Mosquito and Sardinha Formations. In order to better understand these intrusions, a methodology was proposed to identify the igneous intrusions, interpret their compositional variations, and suggest a distinction between the Mosquito and Sardinha Formations. Detailed descriptions of drill cutting samples, X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (DRX), and well logs, such as GammaRay (GR), Density (RHOZ), and Photoelectric Factor (PEFZ), from eight exploratory wells drilled in the main gas-producing area of the Parnaíba Basin, Parque dos Gaviões, were used. The intrusions from these wells were identified through the Igneability Feature and classified based on the GR curve as either "barriguda" or "caixote" features. The data interpretation suggests that the "caixote" intrusions correspond to igneous bodies without compositional variation, while the "barriguda" intrusions indicate variation along the well, evidenced by well logs, chemical and mineralogical composition, related to magmatic differentiation that follows Bowen's Reaction Series.

**Keywords:** Mosquito Formation; Sardinha Formation; Parnaíba Basin; Well logs; Drill cutting samples, X-ray fluorescence; X-ray diffraction

## Sumário

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....   | 16 |
| 1.1   | Objetivos.....   | 17 |
| 2     | ÁREA DE ESTUDO .....   | 18 |
| 3     | GEOLOGIA REGIONAL .....  | 21 |
| 3.1   | Evolução Tectonoestratigráfica .....                                     | 21 |
| 3.2   | Estruturas Tectônicas.....   | 23 |
| 3.3   | Estratigrafia .....  | 25 |
| 3.4   | Rochas ígneas da Bacia do Parnaíba .....                                 | 28 |
| 3.4.1 | Formação Mosquito .....  | 30 |
| 3.4.2 | Formação Sardinha .....  | 31 |
| 3.4.3 | Sistemas Petrolíferos .....  | 31 |
| 4     | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....  | 34 |
| 4.1   | Amostras de calha .....  | 34 |
| 4.2   | Fluorescência de Raios-X (FRX).....                                      | 36 |
| 4.3   | Difração de Raios-X (DRX) .....  | 38 |
| 4.4   | Rochas ígneas.....   | 43 |
| 4.5   | Minerais formadores de rochas ígneas e a Série de Bowen .....            | 45 |
| 4.6   | Processo de cristalização magmática .....                                | 47 |
| 4.7   | Perfis Geofísicos de Poços .....   | 48 |
| 4.7.1 | Raios Gama (GR).....   | 49 |
| 4.7.2 | Densidade (RHOZ) .....   | 50 |
| 4.7.3 | Fator Fotoelétrico (PEFZ) .....  | 51 |
| 5     | Trabalhos prévios.....   | 53 |
| 5.1   | Características das rochas ígneas intrusivas usando perfis de poço ..... | 53 |
| 5.2   | Feição de Igneabilidade .....  | 56 |
| 6     | MATERIAIS E MÉTODOS .....  | 58 |
| 6.1   | Perfis de poço .....   | 59 |
| 6.2   | Descrição de amostras de calha .....                                     | 59 |
| 6.3   | Fluorescência de Raios-X (FRX).....                                      | 61 |
| 6.4   | Difração de Raios-X (DRX) .....  | 64 |
| 6.5   | Controle de qualidade dos dados .....                                    | 66 |
| 6.6   | Tratamento e integração dos dados .....                                  | 68 |
| 7     | RESULTADOS .....   | 71 |
| 7.1   | Perfis de poço.....  | 71 |
| 7.2   | Descrição de amostras de calha .....                                     | 78 |
| 7.3   | Fluorescência de Raios-X em Amostras de Calha.....                       | 85 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.4. Difração de Raios-X em Amostras de Calha .....                | 86  |
| 8. Discussões.....   | 88  |
| 8.2 Correlação de poços .....                                      | 91  |
| 8.6 Hipótese de distinção entre Formações Sardinha e Mosquito..... | 93  |
| 9 CONCLUSÃO .....  | 95  |
| ANEXO A - Resumo estatístico dos dados de perfis.....              | 110 |
| ANEXO B - Descrição de amostras de calha.....                      | 112 |
| ANEXO C - Dados de Fluorescência de Raios-X .....                  | 116 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                    | 97  |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Localização da Bacia do Parnaíba com destaque para sua maior região produtora, o Parque dos Gaviões. Fonte: Relatório Anual de Exploração da ANP (2021).....   | 18 |
| <b>Figura 1:</b> Poços exploratórios terrestres perfurados por bacia entre 2016 e 2021. Fonte: Relatório Anual de Exploração da ANP (2021). .....   | 19 |
| <b>Figura 3:</b> Notificações de Descoberta por bacia entre 2016 e 2021. Fonte: Relatório Anual de Exploração da ANP (2021). .....  | 19 |
| <b>Figura 2:</b> Mapa de localização dos poços utilizados neste trabalho, feito no software ArcGIS. Os...   | 20 |
| <b>Figura 3:</b> Mapa de localização e principais limites tectônicos da Bacia do Parnaíba. Fonte: Araújo, 2015. ....  | 21 |
| <b>Figura 6:</b> Seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba. Fonte: Cunha et al., 2012.....   | 22 |
| <b>Figura 7:</b> Estruturas do Ciclo Brasileiro de compartimentação no Paleozoico (segundo Fortes, 1978). Fonte: Modificado de Santos & Carvalho, 2009. ....  | 23 |
| <b>Figura 8:</b> Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz et al., 2007). Fonte: Araújo, 2015. ....  | 27 |
| <b>Figura 9:</b> Esquemas dos principais formatos de corpos intrusivos, mostrando sua função de interligar os ambientes vulcânico e plutônico e a relação entre diques e soleiras (Jerram, 2011).....   | 29 |
| <b>Figura 4:</b> Secção transversal geológica esquemática de possíveis mecanismos de formação de trapas: (a) alimentadores múltiplos de diques para emplacamento de soleiras (t1) e amalgamento de membros (t2); e (b) alimentador único de diques para emplacamento de soleiras (t1) e variação no nível de emplacamento de soleiras ao longo de um nível de flutuabilidade neutra. Fonte: Modificado de Miranda <i>et al.</i> , 2018..... | 33 |
| <b>Figura 5:</b> Esquema representativo da peneira de lama, com o local de coleta das amostras. Fonte: modificado de Donovan, 2019. ....  | 34 |
| <b>Figura 6:</b> Ilustração esquemática da produção do espectro de raios-X característicos K e L como resultado de um decaimento em cascata de elétrons do nível de energia superior para um mais inferior na estrutura atômica. Fonte: Klein & Dutrow, 2012. ....  | 37 |
| <b>Figura 7:</b> Esquema de excitação e detecção de raios-X utilizado pelos equipamentos de fluorescência de raios-X por dispersão de energia. Fonte: Modificado de Luiz et al., 2014. ....   | 38 |
| <b>Figura 14:</b> Geometria da refração de raios-X de planos igualmente espaçados em uma estrutura cristalina com espaçamento $d$ entre elas. Fonte: Campos Junior, 2014). ....   | 40 |
| <b>Figura 15:</b> Representação esquemática do equipamento de difração de raios-X no método do pó. Fonte: Modificado de Gobbo 2010.....   | 40 |
| <b>Figura 8:</b> Tubo gerador de raios-X de um equipamento de DRX. Fonte: Kahn, (2002). ....  | 41 |
| <b>Figura 17:</b> Diagrama TAS mostrando os campos para os tipos de rochas ígneas. Fonte: Modificado de Gill, 2010. ....  | 44 |
| <b>Figura 18:</b> Esquema ilustrativo da série de Bowen. Fonte: Modificado de Bowen (1922) apud De Oliveira (2023). ....  | 46 |

- Figura 19:** Esquema mostrando, em (A): a variação da temperatura com dentro das soleiras; em (B): a cristalização em uma soleira, da borda para o centro e a concentração de cristais; em (C): variação da concentração de minerais máficos em relação com a profundidade; (D): variação da densidade com relação à profundidade; (E) concentração de Magnésio ao longo da profundidade. Quando há presença de fenocristais ou novo aporte magmático, este processo apresenta uma variação composicional entre o topo e a base. Fonte: Marsh, 2015 *apud* De Oliveira, 2023. .... 48
- Figura 20:** Gráfico relacionando a resolução vertical com a profundidade de investigação de cada ferramenta (Modificado de Bond et al., 2010). .... 49
- Figura 21:** Perfil elétrico de dois poços com intrusivas ígneas identificadas; (a) exemplo de feição típica de soleira na Bacia do Parnaíba., caracterizando o padrão “barriguda”; (b) exemplo de feição típica de dique na Bacia do Paraná, onde o perfil de GR forma o padrão do tipo “caixote”. Fonte: Modificado de Trosdorf Junior *et al.*, 2014. .... 54
- Figura 22:** *Crossplots* utilizados para classificação das rochas ígneas. (A) Teor de sílica e alumínio, (B) GR e teor de tório, (C) Teor de ferro e titânio. Fonte: Modificado de Ran *et al.*, 2014. .... 55
- Figura 23:** Perfis de PEFZ e RHOZ usados para a obtenção da Feição de Igneabilidade, indicada pela hachura vermelha. Fonte: Modificado De Oliveira, 2023. .... 57
- Figura 24:** Fluxograma sintetizando a metodologia utilizada no presente trabalho. .... 58
- Figura 25:** (A) Sacos de pano contendo amostras de calha (B) Calha de alumínio com amostras lavadas para a descrição. .... 60
- Figura 26:** Estereoscópio – Stemi 508, utilizado para descrição das amostras de calha. .... 60
- Figura 27:** Imagem do Software SedLog utilizado para descrição das amostras de calha, correspondente à descrição do poço 1-OGX-101-MA, no intervalo 1413/1434 m. .... 61
- Figura 28:** (A) Filtro de papel utilizado para o escoamento da água das amostras (B) Estufa utilizada para retirar a umidade das amostras. .... 62
- Figura 29:** Gral de Ágata utilizado para macerar as amostras. .... 63
- Figura 30:** Capsulas de plástico utilizados para as análises químicas de FRX. A base do recipiente é o contato entre a amostra e o leitor do equipamento. .... 63
- Figura 31:** Equipamento de fluorescência de Raios-X EPSILON 1 da Malvern Panalytical utilizado para leitura química elementar das amostras de calha. .... 64
- Figura 32:** Moinho de bolas de carbeto de tungstênio do tipo planetário, modelo S1 da Retsch, usado para moer as amostras para a difração de raios-X. .... 65
- Figura 33:** (A) Material preparado para leitura, no porta amostra no formado backloading. (B) Equipamento D2 Phaser utilizado para as análises de DRX. .... 66
- Figura 34:** Gráficos de dispersão que correlacionam as concentrações das amostras com as concentrações das duplicatas dos elementos maiores (em %) obtido pelo FRX, com dados dos seis poços analisados. .... 67
- Figura 35:** Plot relacionando elementos maiores e elementos traço, segundo a metodologia De Oliveira *et al.* (2022), na feição “barriguda” dos poços 1-OGX-101-MA e 4-OGX-49-MA, respectivamente. .... 68
- Figura 36:** Espectro lido e tabela de elementos químicos identificados na amostra de calha do poço 4OGX-49-MA na profundidade de 1623 m gerados pelo software do equipamento de FRX utilizado. .... 69

- Figura 37:** Perfis esquemáticos dos poços estudados com a localização das rochas ígneas identificadas a partir dos dados de perfis de poços..... 71
- Figura 38:** Gráfico que relaciona a espessura e profundidade de ocorrência dos corpos ígneos com as feições “caixote” e “barriguda” observadas no perfil de GR, como proposto por Trosdorf Junior et al. (2014). Os valores de profundidade são apresentados em cota e calculados conforme a Equação 4. .... 74
- Figura 39:** Gráficos de histograma comparando os valores de GR e RHOZ das feições "caixote" e "barriguda". .... 75
- Figura 40:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 1-OGX-93-MA em três eletrofacies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®..... 76
- Figura 41:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 1-OGX-101-MA em três eletrofacies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®..... 76
- Figura 42:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 1-OGX-101-MA em três eletrofacies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®..... 77
- Figura 43:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 3-PGN-5-MA em três eletrofacies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®. .... 77
- Figura 44:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 4-OGX-49-MA em três eletrofacies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®..... 78
- Figura 45:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “barriguda” do poço 1-OGX-101-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) Topo da soleira, rica em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina; (C) Zona dos óxidos com presença de óxidos; (D) e (E) Zona das olivinas, na porção basal da soleira, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e olivina. .... 81
- Figura 46:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “barriguda” do poço 1-OGX-93-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) Topo da soleira, rica em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina; (C) Zona dos óxidos com presença de óxidos; (D) e (E) Zona das olivinas, na porção basal da soleira, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e olivina. .... 81
- Figura 47:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “barriguda” do poço 4-OGX-49-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) Topo da soleira, rica em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina; (C) Zona dos óxidos com presença de óxidos; (D) e (E) Zona das olivinas, na porção basal da soleira, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e olivina. .... 82
- Figura 48:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “caixote” do poço 1-OGX-93-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) e (C) ricas em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina. .... 82
- Figura 49:** Foto de fragmento metálico oriundo da perfuração do poço encontrada na amostra de calha do poço 1-OGX-101-MA, profundidade 1476 m. .... 83
- Figura 50:** Calcita de tampão de combate à perda de circulação encontrada na amostra de calha do poço 1-OGX-101-MA, profundidade 1491 m. .... 84

- Figura 51:** Material componente do fluido de perfuração encontrado na amostra de calha do poço 1-OGX-93-MA na profundidade de 1608 m..... 84
- Figura 52:** Diagrama de Pearce que correlaciona os valores de Nb/Y X Zr/TiO<sub>2</sub> utilizado para classificação de rochas ígneas básicas. O círculo pontilhado indica as amostras referentes à zona de anomalia de GR..... 85
- Figura 53:** Difractogramas de amostras de calha do poço 1-OGX-101-MA em uma soleira com a “feição barriguda”, na zona da anomalia de GR e na zona dos óxidos, respectivamente. .... 87
- Figura 54:** Correlação das facies obtidas através da descrição das amostras de calha, perfis de poços, fluorescência e difração de raios-X do poço 1-OGX-101-MA..... 89
- Figura 55:** Crossplot de RHOZ X GR segundo a metodologia de Zou et al., 2013 para classificação das rochas ígneas. .... 90
- Figura 56:** Identificação dos corpos ígneos utilizando a Feição de Igneabilidade e correlação entre os poços 1-OGX-93-MA, 4-OGX-49-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-101-MA e 3-PGN-5-MA a partir das soleiras de feição “barriguda”..... 92
- Figura 57:** Crossplot de frequências de RHOZ x GR mostrando os dois grupos com diferentes valores, o de Alta Densidade, correlacionado com a Formação Mosquito e o de Baixa Densidade, correlacionado com a Formação Sardinha. As linhas pontilhadas correspondem à mediana dos valores de basaltos de baixo e alto Ti para as Formações Mosquito e Sardinha..... 94

## Índice de Tabelas

**Tabela 1:** Relação dos poços usados no trabalho com os intervalos analisados para cada método.59

**Tabela 2:** Resumo das características dos corpos ígneos identificados em oito poços pertencentes à área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. Foram definidas 40 intrusões, de 0,3 a 185,3 m de espessura, sendo 8 com feição “caixote” e 32 “barriguda” ..... 73

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

ANF - Anfibólio

ARN - Arenito

BCO - Branco

CAL - Calcita

DIA - Diabásio

DRO - Duro

FAN - Fanerítico

FLU PER - Fluido de perfuração

GR - Perfil de Raios Gama

HCAL - Perfil de Caliper

MAC - Maciço

MAG - Magnetita

MLE - Mole

OLI - Olivina

OXI - Óxidos

PEFZ - Perfil de Fator Fotoelétrico

PG - Plagioclásio

PRT - Preto

PX - Piroxênio

RAR - Raro

RG ME - Fragmento metálico

RHOZ - Perfil de Densidade

SDR - Semi-duro

TRC - Traço

## 1 INTRODUÇÃO

A Bacia do Parnaíba tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos, visando o melhor entendimento de sua geologia e sistemas petrolíferos. Atualmente, essa é a bacia *onshore* do Brasil que mais produz gás natural (ANP, 2021), tendo sua exploração diretamente relacionada às intrusões magmáticas, considerada um novo análogo para a exploração de gás globalmente (Daly *et al.*, 2018). As rochas ígneas nas bacias paleozoicas brasileiras podem ser responsáveis pela geração de petróleo, além de se enquadrar como selo, reservatório e trapa (Thomaz Filho *et al.*, 2008; Miranda *et al.*, 2018).

O magmatismo ocasionado pelos rifteamentos do Jurássico e do Cretáceo atingiu diversas bacias brasileiras, sendo a Bacia do Parnaíba marcada pela ocorrência de dois eventos de magmatismo máfico compostos por intrusões de diabásio, que geraram uma grande variedade de corpos ígneos evidenciados na forma de derrames, diques e soleiras divididos em Formação Mosquito e Formação Sardinha (Aguiar, 1971; Vaz *et al.*, 2007; Trosdtorf Junior *et al.*, 2014).

Os principais alvos exploratórios da Bacia do Parnaíba estão relacionados ao trapeamento provocado pelas soleiras, caracterizado pela formação de altos estruturais (Trosdtorf Junior *et al.*, 2014). As rochas geradoras dessa bacia também foram fortemente influenciadas pelas intrusões tardias, responsáveis pelo incremento térmico necessário para a maturação da matéria orgânica (Rodrigues 1995; Trosdtorf Junior *et al.*, 2014).

Identificar o papel da rocha ígnea é essencial para o sucesso exploratório em bacias onde este tipo de rocha se faz presente (Lobo, 2007 *apud* Fornero, 2018). A complexidade e heterogeneidade das soleiras exigem uma abordagem multidisciplinar para uma caracterização abrangente e precisa acerca da composição química, geometria e mecanismo das intrusões. Nesse sentido, diversos autores utilizam dados geológicos, geofísicos e/ou geoquímicos para identificar e caracterizar as rochas ígneas (Le Maitre *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2012; Trosdtorf Junior *et al.*, 2014; Ran *et al.*, 2014, De Oliveira *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2018; Fornero, 2018).

Trosdtorf Junior *et al.* (2014) utilizou perfis de poço para classificar as intrusões da Bacia do Parnaíba em feição “barriguda” e feição “caixote”, padrões observados

por De Oliveira (2023) também na Bacia do Paraná. Com o objetivo de entender as particularidades de cada feição e as respostas dos perfis de poço ao passarem por rochas ígneas intrusivas, será apresentada uma metodologia baseada na integração de amostras de calha, petrofísica e análises geoquímicas.

Ao longo do trabalho será apresentada detalhadamente as pesquisas bibliográficas que embasaram o trabalho, a metodologia utilizada e os resultados obtidos, que possibilitaram a realização de uma interpretação dos dados de poço. Espera-se que, através da metodologia apresentada, este trabalho contribua com as pesquisas acerca das intrusões, contribuindo no entendimento da dinâmica entre os processos e elementos formadores do sistema petrolífero atípico da Bacia do Parnaíba e de bacias análogas, reduzindo suas incertezas exploratórias.

## 1.1 Objetivos

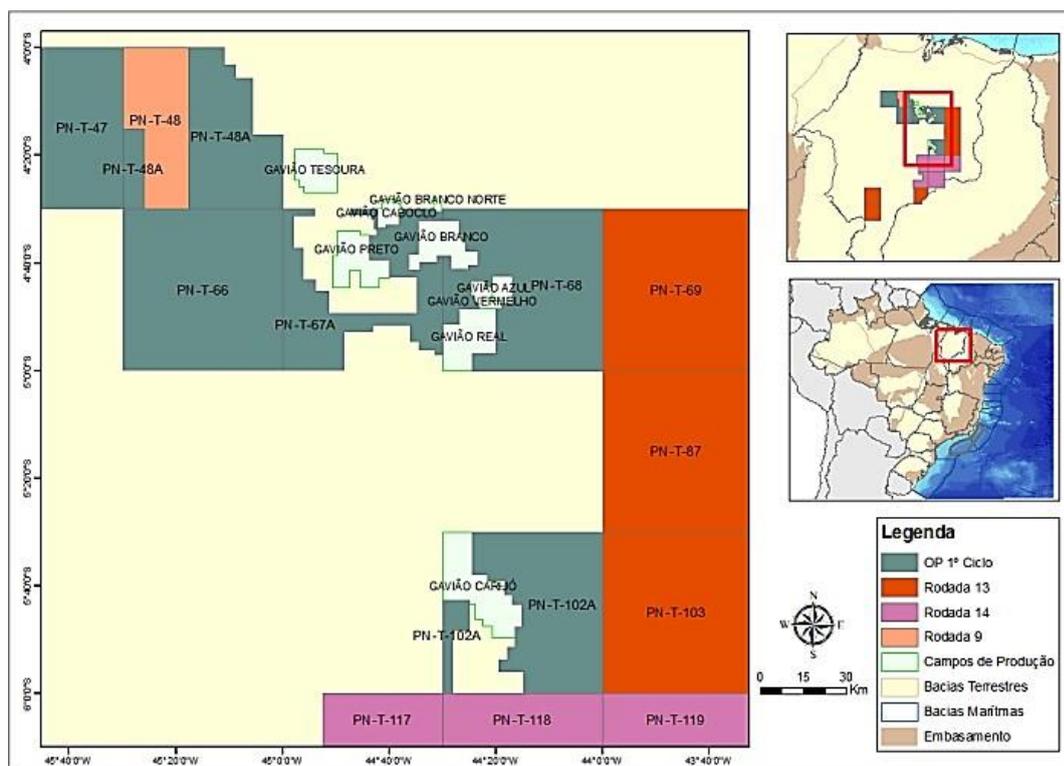
O objetivo principal deste trabalho é o entendimento das variações verticais ao longo das intrusões de diabásio com feição “barriguda” e “caixote” na Bacia do Parnaíba usando perfis de poços, dados de fluorescência e difração de raios-X e a descrição de amostras de calha.

Os objetivos específicos são:

- Entender a variação lateral das soleiras a partir da correlação de poços;
- Propor o motivo das variações composicionais entre as diferentes soleiras de diabásio;
- Identificar eletrofacies e quimiofacies dos corpos ígneos, relacionando-as à variação composicional;
- Propor uma hipótese para distinção entre as intrusões da Formação Mosquito e Formação Sardinha usando dados de operações geológicas em poços.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

Segundo o Relatório Anual de Exploração da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2021), a Bacia do Parnaíba figura como uma das maiores bacias produtoras de gás natural *onshore*. A produção advém majoritariamente da região centro-norte da bacia, onde se localiza o Parque dos Gaviões, complexo de campos produtores de gás natural da região, destacando-se os campos de Gavião Caboclo, Gavião Branco, Gavião Real e Gavião Vermelho entre os maiores produtores do Brasil (Figura 1).

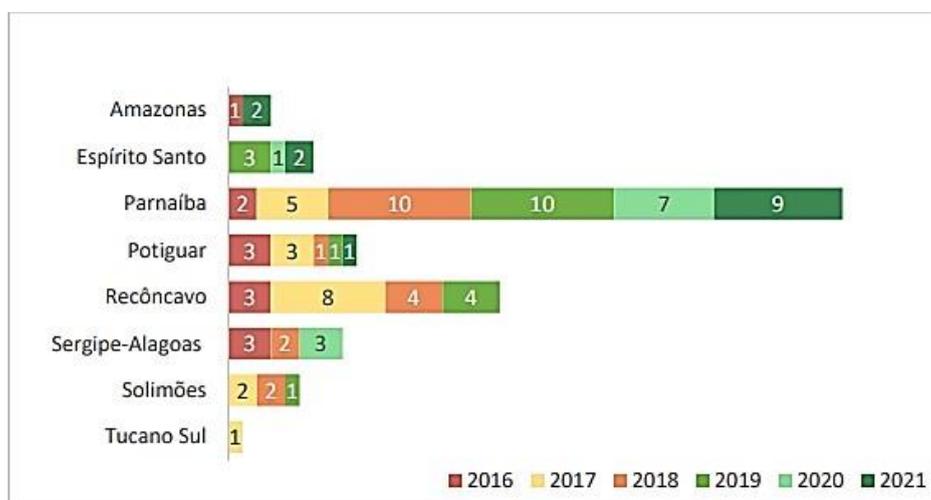


**Figura 1:** Localização da Bacia do Parnaíba com destaque para sua maior região produtora, o Parque dos Gaviões. Fonte: Relatório Anual de Exploração da ANP (2021).

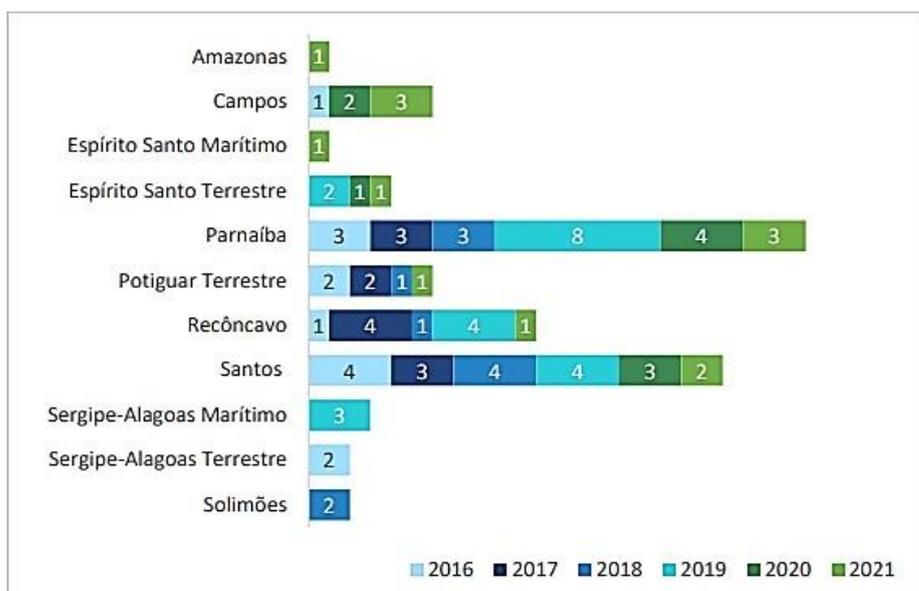
Segundo Daly *et al.* (2018), a exploração de petróleo na Bacia do Parnaíba teve início no final da década de 1940 e teve sua exploração intensificada durante a década de 1950, com a criação da Petrobras. Mas somente na década de 2000, a bacia tornou-se produtiva, com a descoberta econômica de campos de gás.

A Bacia do Parnaíba, enquanto nova fronteira exploratória, tem sido uma importante evidência da relevância do investimento em atividades exploratórias de novas áreas no Brasil. Atualmente, é a bacia terrestre com maior área sob contrato (46.000 km<sup>2</sup>), sendo responsável por 46% do total de poços terrestres exploratórios

perfurados nos últimos seis anos (Figura 2) e pelo maior número de descobertas de gás natural desde 2016, conforme Figura 3 (ANP, 2021).



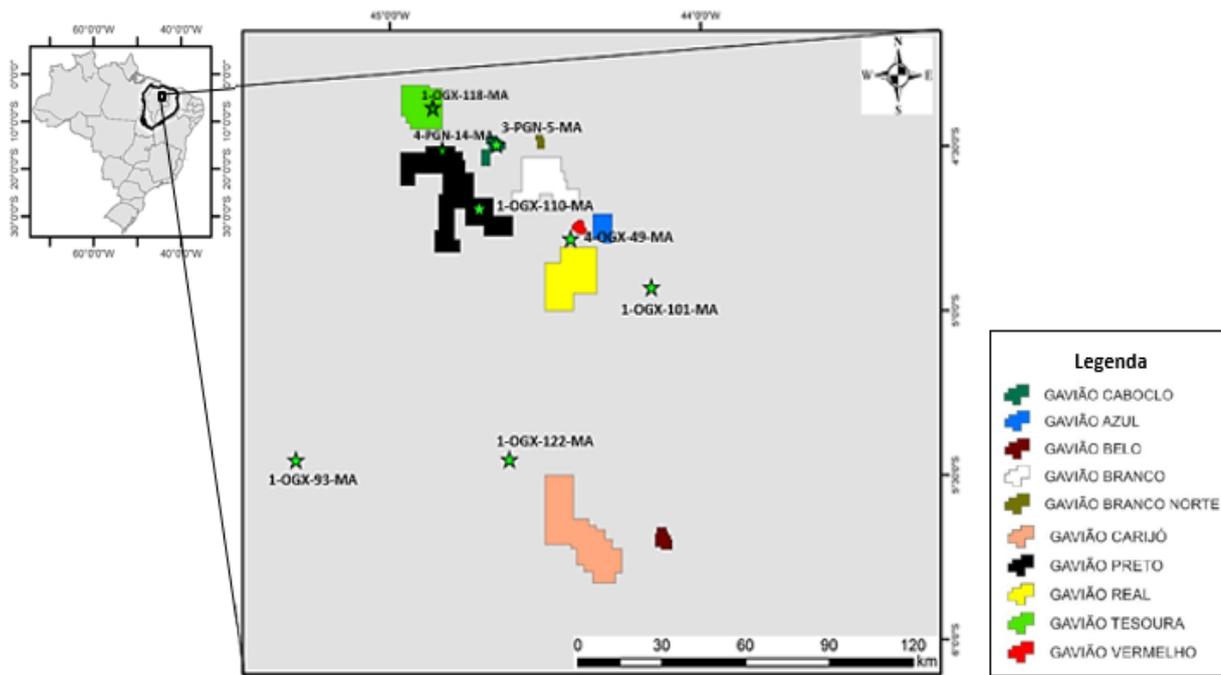
**Figura 2:** Poços exploratórios terrestres perfurados por bacia entre 2016 e 2021. Fonte: Relatório Anual de Exploração da ANP (2021).



**Figura 3:** Notificações de Descoberta por bacia entre 2016 e 2021. Fonte: Relatório Anual de Exploração da ANP (2021).

O sucesso exploratório e a comprovação de novas reservas na Bacia do Parnaíba, ao longo da última década, têm propiciado novas frentes no setor energético, ajudando a atender as demandas do país, além de impulsionar o desenvolvimento e a melhoria da infraestrutura das regiões interiores do Norte do Brasil (ANP, 2021).

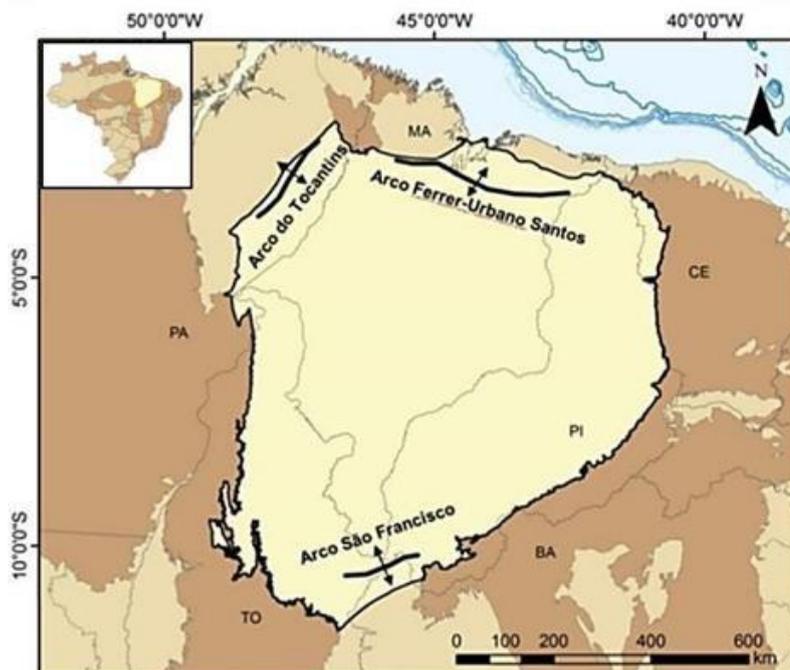
Os seis poços estudados neste trabalho pertencem à Bacia do Parnaíba e se localizam na região do Parque dos Gaviões, sendo eles: 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-122-MA, 3-PGN-5-MA e 4-OGX-49-MA, apresentados na Figura 4.



**Figura 4:** Mapa de localização dos poços utilizados neste trabalho, feito no software ArcGIS. Os shapefiles utilizados foram obtidos das bibliotecas ANP e CPRM.

### 3 GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia do Parnaíba foi formada durante a Era Paleozoica e é classificada como intracontinental cratônica (Cordani *et al.*, 1984; Cunha, 1986; Vaz *et al.*, 2007; Castro *et al.*, 2014), ocupando uma área de mais de 600.000 km<sup>2</sup> do Nordeste brasileiro, abrangendo os estados de Piauí, Maranhão, Ceará, Tocantins, Pará e Bahia (Vaz *et al.*, 2007). Essa apresenta 3500 m de espessura da coluna sedimentar em seu depocentro (Vaz *et al.*, 2007), limitando-se ao Norte pelo Arco Ferrer-Urbano Santos, separando-a das Bacias do São Luís e Barreirinhas; a Noroeste pelo Arco de Tocantins, separando-a da Bacia de Marajó e do Cráton Amazônico; a Sudeste faz fronteira com a Bacia do São Francisco, onde é limitada pelo Arco de São Francisco e a Leste limita-se pela Província Borborema (Vetorazzi, 2012), (Figura 5).

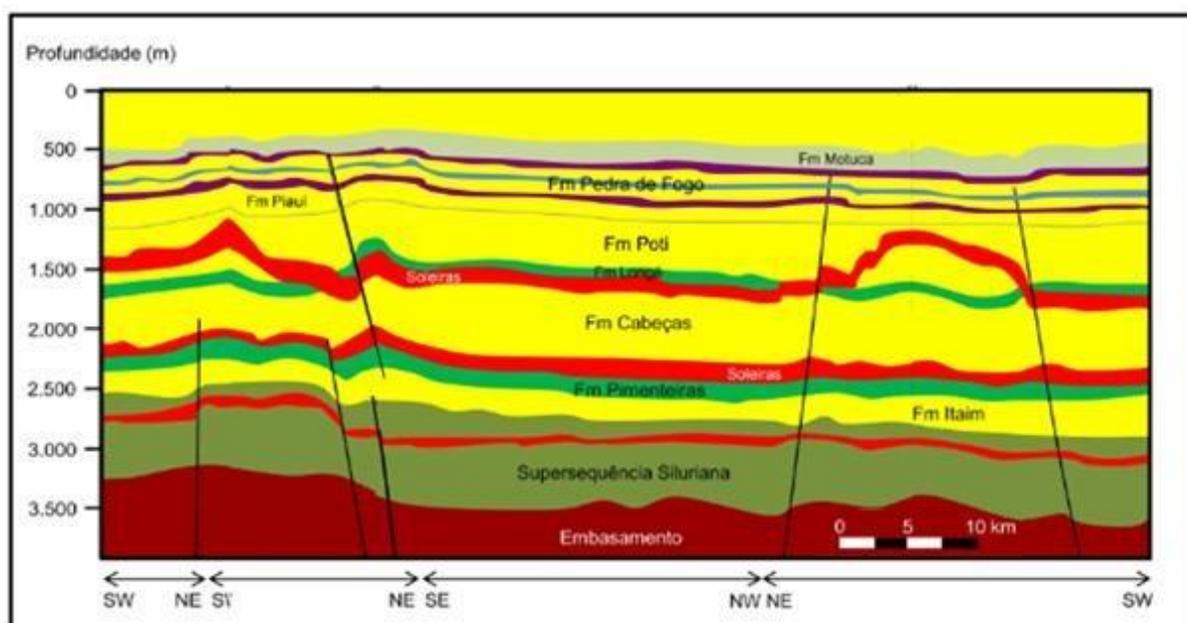


**Figura 5:** Mapa de localização e principais limites tectônicos da Bacia do Parnaíba. Fonte: Araújo, 2015.

#### 3.1 Evolução Tectonoestratigráfica

Essa bacia desenvolveu-se durante a fase de estabilização da Plataforma Sul-Americana, posicionando-se sobre um embasamento constituído por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, com idades entre o Eon Arqueano e o Período Ordoviciano (Vaz *et al.*, 2007) (Figura 6). Porém, predominam rochas formadas entre o final do Proterozóico e o início do Paleozoico, que corresponde ao período de consolidação dessa plataforma (Vaz *et al.*, 2007).

Como unidade deposicional, a origem da Bacia do Parnaíba está relacionada aos eventos deformacionais orogênicos do Ciclo Brasileiro, após a colisão entre as plataformas Amazônica e Brasileira (Caputo, 1984; Vaz *et al.*, 2007) no fim do Ordoviciano (Caputo *et al.*, 2005). Na fase final do Ciclo Brasileiro, a contração da litosfera, devido ao seu resfriamento e descompressão, favoreceu a reativação de extensos blocos de falhas normais e fraturas do Pré-Cambriano – Lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês, que até o Eocarbonífero controlaram o eixo deposicional da bacia (Figueiredo & Raja Gabaglia, 1986; Cunha, 1986; Vaz *et al.*, 2007). Segundo Vaz *et al.*, 2007, a partir do Siluriano a evolução da bacia seguiu para uma fase de sinéclise flexural, definindo sua forma ovalada e reorientando seu depocentro para a parte central.



**Figura 6:** Seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba. Fonte: Cunha *et al.*, 2012.

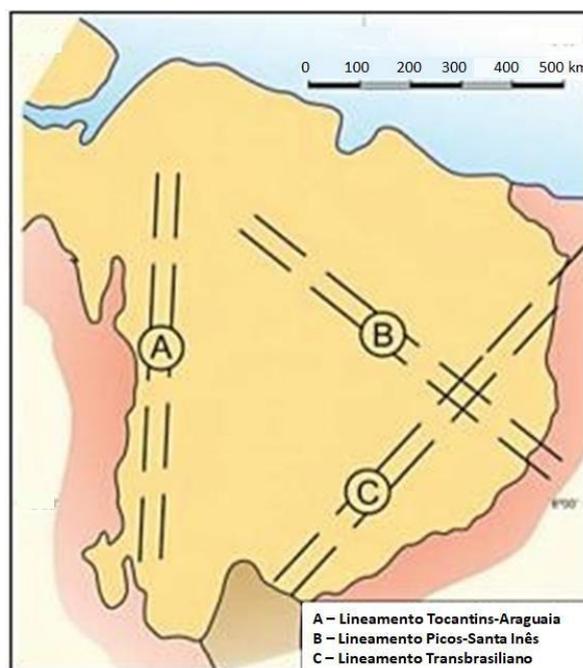
Além da subsidência causada por estiramento litosférico, a evolução sedimentar da bacia foi afetada pela variação da curva do nível do mar, marcada por episódios de regressão e transgressão (Almeida & Carneiro, 2004). Foi invadida muitas vezes, até o Eocarbonífero, por mares epicontinentais que transgrediam a bacia através do norte da África. A maior parte das áreas fontes de sedimentos se situava na África central, com menor aporte sedimentar das áreas do escudo brasileiro (Caputo *et al.*, 2005). As respostas no registro sedimentar teriam contribuições de ascensões epirogênicas, como consequência das orogêneses ocorridas na borda

ativa meridional do Gondwana, adjacente à plataforma. Esses movimentos tectônicos influenciaram nas regressões marinhas, que deram origem aos hiatos deposicionais nas bacias intracratônicas (Miall, 1984; Almeida & Carneiro, 2004).

Ainda, fazem parte do desenvolvimento da Bacia do Parnaíba duas fases de magmatismo ocorridas durante o ciclo Mesozoico, representadas por diques e soleiras de rochas ígneas básicas, sendo rochas de ambientes distensionais, resultado da separação dos supercontinentes Pangea e Gondwana (Góes & Feijó, 1994). Segundo Arce *et al.* (2006), esse magmatismo foi canalizado em parte ao longo de fraturas preexistentes no embasamento da bacia, relacionadas ao desenvolvimento do rifte atlântico.

### 3.2 Estruturas Tectônicas

O embasamento da bacia é cortado por três grandes lineamentos herdados do Pré-Cambriano: Transbrasiliano, Picos-Santa Inês e Tocantins-Araguaia (Figura 7), além da estrutura conhecida como Arco de Xambioá (Góes & Coimbra, 1996; Ferraz, 2015).



**Figura 7:** Estruturas do Ciclo Brasileiro de compartimentação no Paleozoico (segundo Fortes, 1978).  
Fonte: Modificado de Santos & Carvalho, 2009.

O Lineamento Transbrasiliano (LTB) é a zona de falha mais proeminente do território brasileiro e a mais notável estrutura da Bacia do Parnaíba, definida como uma faixa cataclásada com cerca de 2700 km de extensão (Milani & Zalán, 2000; Schobbenhaus *et al.*, 1975 *apud* Goulart, 2019). Segundo alguns autores, o LTB representa a reativação da mega sutura que esteve ativa durante os eventos tectonomagmáticos de formação do supercontinente Gondwana, entre o final do Proterozóico e o início do Paleozoico (Marini *et al.*, 1984; Cordani *et al.*, 2000; Almeida & Carneiro, 2004; Praxedes, 2015). Na Bacia do Parnaíba, o LTB está associado ao principal depocentro de sedimentos do Paleozoico (Cordani *et al.*, 2013).

O Lineamento Picos-Santa Inês corresponde a uma zona cisalhada orientada no sentido NW-SE, com 160 km de extensão (Cunha, 1986; Vetorazzi, 2012). Dados disponíveis sugerem que zonas de cisalhamento regionais podem ter desempenhado papel fundamental no alojamento dos corpos magmáticos (Daly *et al.*, 2018). Neste contexto, o Lineamento Picos-Santa Inês coincide com a ocorrência de diques subverticais de direção NW-SE, que se destaca como uma possível zona de alimentação de soleiras (Trosdorf Junior *et al.*, 2014).

O Lineamento Tocantins-Araguaia possui orientação N-S, sendo responsável pelos intensos falhamentos na borda Oeste da Bacia do Parnaíba, evidenciando notáveis mudanças nas estruturas das camadas em relação à porção leste e central da bacia (Kegel, 1965). O Lineamento Tocantins-Araguaia foi formado no Permiano, quando a Antéclise Tocantins-Araguaia e o Arco Tocantins se elevaram, encerrando as comunicações entre as Bacias Amazonas e Parnaíba (Santos & Carvalho, 2009).

O Arco de Xambioá, de orientação E-W, outro elemento tectônico de destaque situado no centro da Bacia do Parnaíba, foi um alto interno durante o Paleozoico (Aguilar, 1969). No Mesozoico, a fragmentação do Pangea formou um sistema de rifts interior que modificou o arcabouço tectônico da bacia e delimitou uma nova área de subsidência, passando a Estrutura de Xambioá a compor um novo eixo deposicional (Hasui *et al.*, 1991; Goés, 1995). As direções dos lineamentos magnéticos na borda oeste da bacia indicam que o sistema de falhas normais alinhado por grábens que ocorrem sobre o Arco de Xambioá exerceu controle estrutural no Magmatismo Mosquito (Goés, 1995).

### 3.3 Estratigrafia

O preenchimento sedimentar da Bacia do Parnaíba é constituído por uma sequência de rochas sedimentares e ígneas que datam do Paleozoico ao Eocretáceo, divididas estratigraficamente em cinco supersequências, denominadas da base para o topo como: Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea, delimitadas por discordâncias que se estendem por toda a bacia (Vaz *et al.*, 2007) (Figura 8).

A sequência Siluriana é litoestratigraficamente correspondente ao Grupo Serra Grande e representa um ciclo transgressivo-regressivo completo (Vaz *et al.*, 2007), caracterizado pela deposição alternada de sedimentos continentais e de mar raso. Posteriormente foi redefinido por Caputo & Lima (1984), que a subdividiram em três formações: Ipu, Tianguá e Jaicós. Essa sequência se depositou em ambientes glacial, fluvial, marinho raso, leques e frentes deltáicas (Caputo & Lima, 1984; Góes & Feijó, 1994). Essa supersequência é assentada discordantemente sobre o embasamento da bacia.

A sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera é correspondente ao Grupo Canindé, composta pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. Essa seção encontra-se em toda a extensão da bacia e é separada da sequência Siluriana por uma discordância erosional relacionada a uma ampla regressão mundial (Caputo & Lima, 1984). Foi depositada em ambientes deltaicos e plataformais, dominados por maré e tempestade, podendo ocorrer fácies fluvio-estuarinas e eventual influência periglacial (Caputo, 1984; Góes & Feijó, 1994; Della Fávera, 1990; Caputo *et al.*, 2005; Vaz *et al.*, 2007).

A sequência Neocarbonífera-Eotriássica correspondente ao Grupo Balsas e é dividida nas formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba, onde a deposição é atribuída a soerguimentos locais da bacia, explicando sua ausência em algumas das áreas de borda dessa sinéclise (Caputo, 1984; Vaz *et al.*, 2007). Essa sequência foi depositado em condições climáticas quentes e semiáridas em paleoambientes marinho raso a litorâneo sob influência de tempestades, continental desértico, desértico com contribuição fluvial e incursões marinhas (Lima & Leite 1978; Caputo, 1984; Góes & Feijó, 1994; Caputo *et al.*, 2005; Vaz *et al.*, 2007).

Segundo Vaz *et al.* (2007), a sequência Jurássica teve sua deposição associada à subsidência ocasionada pelo peso das rochas magmáticas da Formação Mosquito. É representada pela Formação Pastos Bons e pelas intrusões da Formação Mosquito. Essa sequência foi depositada em paleoambiente de clima semiárido a árido com influência fluvial e lacustre, marcada exclusivamente por uma sedimentação continental (Vaz *et al.*, 2007).

A Sequência Cretácea é constituída pelas formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru (Vaz *et al.*, 2007) e esteve condicionada à ruptura do continente Gondwana, gerando fraturas que possibilitaram a ocorrência de um intenso magmatismo na Bacia do Parnaíba, que deu origem à Formação Sardinha. A deposição dessa sequência está associada a grandes ciclos marinhos regressivos-transgressivos. Os paleoambientes em que essa sequência foi depositada são marcados por sistema desértico, depósito de ambiente marinho raso, fluvio-deltaico, lacustre e estuarinos (Rossetti *et al.*, 2001; Mendes, 2007).

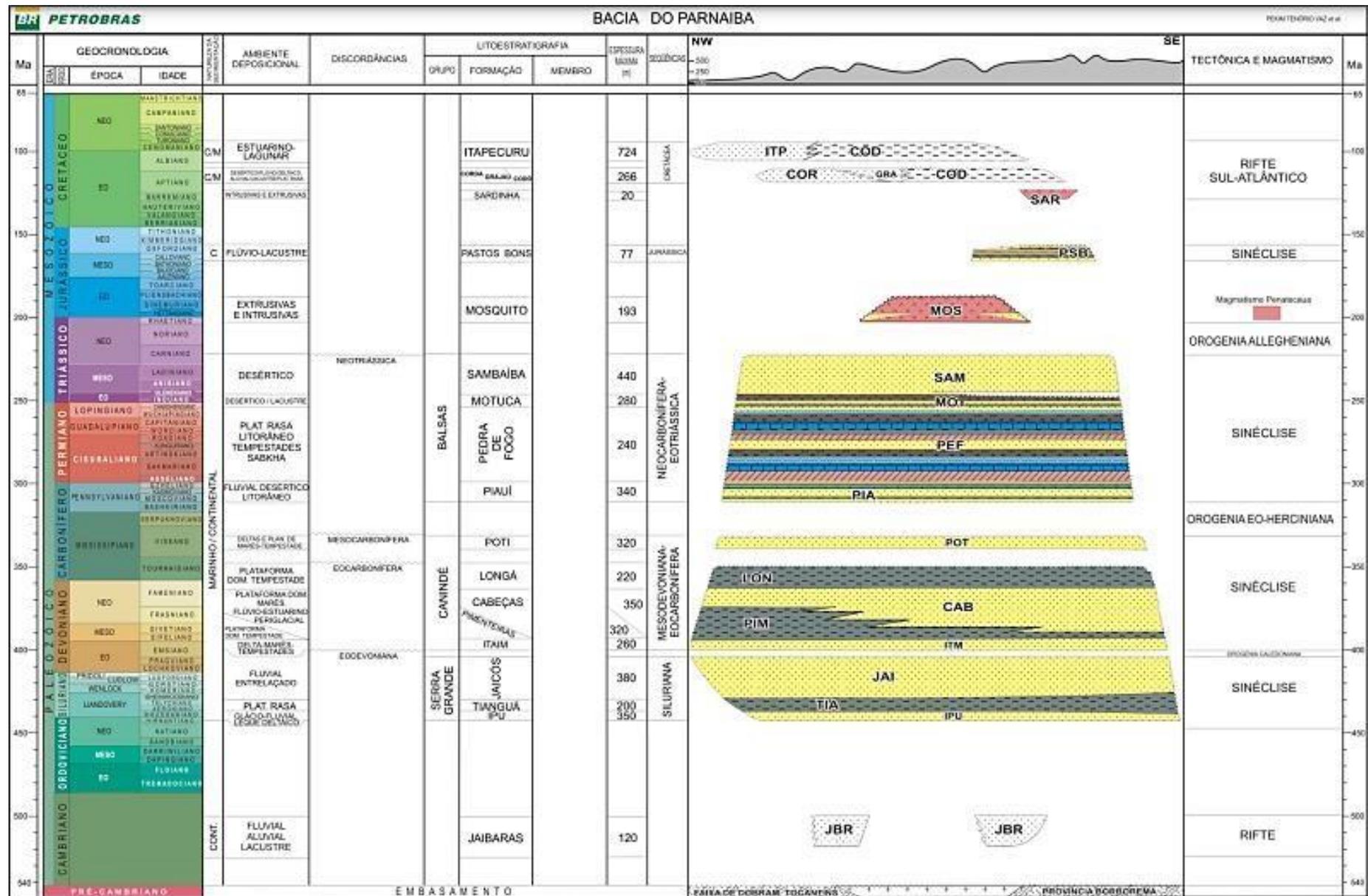


Figura 8: Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz et al., 2007). Fonte: Araújo, 2015.

### 3.4 Rochas ígneas da Bacia do Parnaíba

As intrusões da Bacia do Parnaíba associam-se à ocorrência de eventos Mesozoicos fundamentais para a evolução da Plataforma Sul-Americana, marcados por episódios distensionais, remobilização de falhas e surgimento de fraturas. Durante essa era, a bacia foi afetada por atividades magmáticas intensas, que resultaram em fluxo magmático e no posicionamento de diques e soleiras (Ernesto *et al.*, 2002).

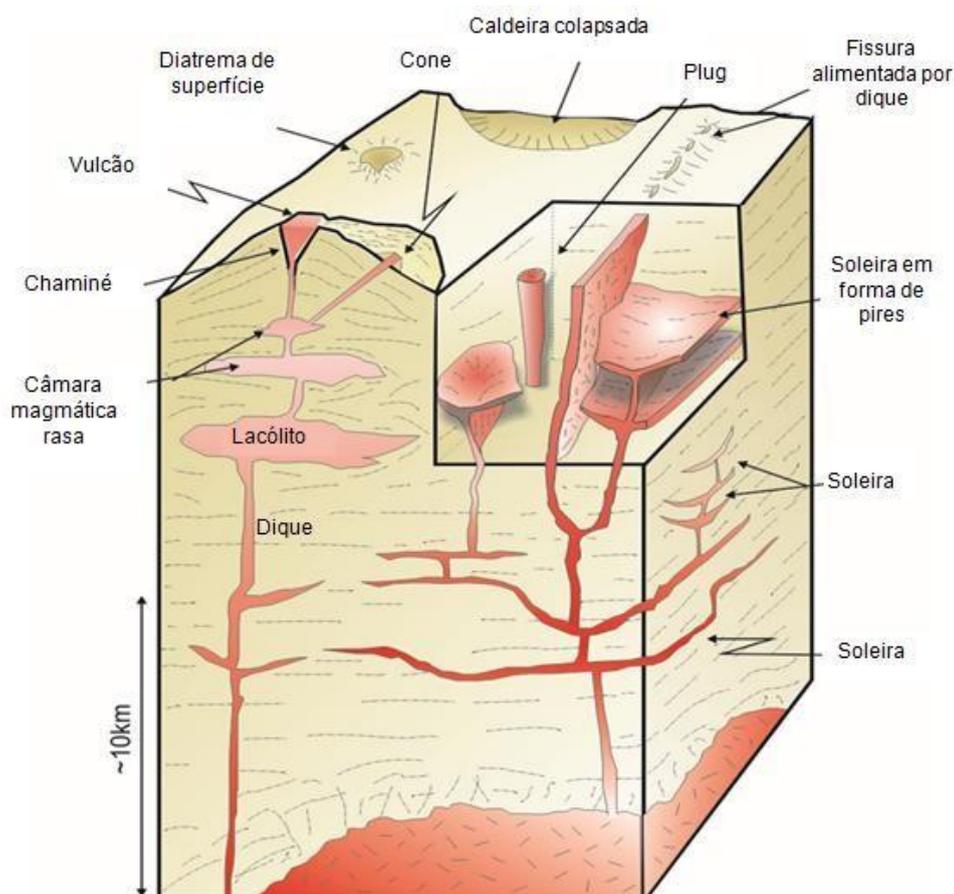
A duração da atividade magmática persistiu muito mais do que nas outras bacias paleozóicas brasileiras, apresentando três fases de atividade magmática (Daly *et al.*, 2018). O primeiro evento, de característica vulcânica a subvulcânica félsica, ocorreu no Cambriano, precedendo então, a formação da bacia (Daly *et al.*, 2018; Oliveira & Mohriak, 2003). Suas rochas estão espalhadas na Província Borborema e se correlacionam com as vulcânicas e plutônicas Jaibaras (Oliveira & Mohriak, 2003). As outras duas fases são posteriores à formação da Bacia do Parnaíba, datadas do Mesozoico, vistas em afloramento e em subsuperfície (Daly *et al.*, 2018).

Nesse contexto, os registros ígneos da Bacia do Parnaíba foram ocasionados principalmente pelo rifteamento Jurássico do mega continente Pangea, que acabou por estabelecer no Brasil um novo estágio tectônico que levaria à abertura do Oceano Atlântico durante o Cretáceo, ocasionando reativação e formação de falhamentos (Almeida & Carneiro, 2004; Zalán, 2004; Vaz *et al.*, 2007). Acomodaram-se na bacia rochas ígneas intrusivas (diques e soleiras) e extrusivas, de composição básica, as quais, do ponto de vista estratigráfico, foram divididas em duas unidades: Formação Mosquito de idade Eojurássica e Formação Sardinha, Eocretácea, expostas na porção ocidental e oriental da bacia, respectivamente (Vaz *et al.*, 2007 *apud* Mocitaba *et al.*, 2017; De Oliveira *et al.*, 2018).

Segundo Oliveira *et al.*, (2003), essas duas unidades são distintas em: forma de ocorrência em subsuperfície, natureza química e isotópica, idade e localização. Em subsuperfície, os diques e soleiras estão presentes em maior quantidade na Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera, ocorrem também na Sequência Siluriana e são muito raros na Neocarbonífera-Eotriássica (Miranda *et al.*, 2018).

Baseado em interpretações sísmicas, são observadas soleiras em uma grande extensão da Bacia do Parnaíba, sem uma possível distinção entre Formação Mosquito

e Sardinha (Vaz *et al.*, 2007). Nessa bacia predominam soleiras do tipo “paralela à camada” (*layer parallel*, segundo Planke *et al.*, 2005), que podem variar de 2 até 300m. Também são frequentes soleiras na “forma de pires” (*saucer shape* segundo Planke *et al.*, 2005), caracterizadas pela base plana e bordas arqueadas; na forma “planar inclinada” (*climbing saucer shape*, segundo Planke *et al.*, 2005), associadas às sinéclises paleozoicas; e na forma “salto de soleira” (semelhante a forma *layer-parallel rough* de Planke *et al.*, 2005), marcadas pelas intrusões de maior amplitude nos grábens precursoros da bacia (Figura 9) (Conceição *et al.*, 1993; Oliveira & Mohriak, 2003; Porto, 2013; Trosdorf Junior *et al.*, 2014; Pedrosa Junior *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2018). Os diques são caracterizados por perda de qualidade sísmica, por vezes apresentando-se empilhados com padrão de “v” invertido, marcados pela ausência aparente de seção devido ao contato discordante com as camadas sedimentares (Trosdorf Junior *et al.*, 2014).



**Figura 9:** Esquemas dos principais formatos de corpos intrusivos, mostrando sua função de interligar os ambientes vulcânico e plutônico e a relação entre diques e soleiras (Jerram, 2011).

### 3.4.1 Formação Mosquito

Com base nos resultados de datação K-Ar e Ar-Ar, Oliveira *et al.* (2003) indicam que a Formação Mosquito representa o evento magmático ocorrido no Eojurássico, com uma idade aproximada de 178 milhões de anos. Esse evento está associado ao tectonismo que resultou na fragmentação do supercontinente Pangea e no consequente rifteamento do Atlântico Central, estando inserida na atividade conhecida como Província Magmática do Atlântico Central (CAMP), conforme mencionado por Marzoli *et al.* (1999) e Merle *et al.* (2011). A Província Magmática do Atlântico Central é uma das maiores províncias de basaltos continentais, formada por corpos toleíticos intrusivos e extrusivos, que ocorrem na Europa, África e Américas do Norte e do Sul (Marzoli *et al.*, 1999; Merle *et al.*, 2011).

Para Zalàn (2004) e Thomaz Filho *et al.* (2008), a Formação Mosquito tem correlação com as soleiras de diabásio das Bacias do Solimões e Amazonas, relacionadas ao magmatismo Penatecaua. As rochas da Formação Mosquito ocorrem mais frequentemente na porção centro-oeste da Bacia do Parnaíba e consistem de basaltos toleíticos amigdaloidais, eventualmente intercalados com arenitos vermelhos com leitos de sílex (Góes e Feijó, 1994). Essa formação apresenta um magmatismo marcado por grandes derrames e extensas soleiras, representadas na carta estratigráfica sobrepostas aos arenitos da Formação Sambaíba e sotopostas à Formação Pastos bons (Vaz *et al.*, 2007).

Em geral, os basaltos da Formação Mosquito apresentam granulação fina e matriz composta por plagioclásio, piroxênio (augita e pigeonita), óxidos de Fe-Ti (magnetita e ilmenita), vidro vulcânico com vesículas/amígdalas preenchidas com calcita, quartzo e zeólitas. Apatita, pirita e calcopirita ocorrem minoritariamente e os raros feldspatos alcalinos indicam um estágio tardio de cristalização. Evidencia-se ainda a ocorrência de mica e anfibólio como minerais secundários, formados após a alteração do plagioclásio e piroxênio, respectivamente (Oliveira *et al.*, 2003).

Estudos geoquímicos indicam que as rochas basálticas da Formação Mosquito são toleíticas com alta ou baixa concentração de Titânio, que consistem respectivamente em basaltos ricos em olivina/hiperstênio (silicato de magnésio e ferro) e basaltos ricos em quartzo/hiperstênio, ambas apresentando características petrogênicas dos reservatórios de manto enriquecidos (Oliveira *et al.*, 2003).

### 3.4.2 Formação Sardinha

A atividade ígnea da Formação Sardinha está inserida tectonicamente no conjunto de eventos Eocretáceos, onde se incluem os derrames continentais da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná e o Enxame de Diques Rio Ceará-Mirim na Província Borborema. Esses eventos magmáticos ocorreram durante a fragmentação do Gondwana que culminaram na abertura do oceano Atlântico Sul, inserindo, então, a Formação Sardinha na Província Magmática Paraná-Etendeka (Oliveira *et al.*, 2003; Vaz *et al.*, 2007, Mocitaiba *et al.*, 2017). Góes e Feijó (1994) e Milani e Zalán (2000) correlacionaram a Formação Sardinha à Formação Serra Geral, na Bacia do Paraná, devido à sua contemporaneidade e semelhanças composicionais.

Com idade de aproximadamente 124 Ma, baseado no método de datação K-Ar e Ar-Ar, as rochas da Formação Sardinha foram definidas por Aguiar (1971) como basaltos amigdaloidais de coloração preta a roxa, evidenciados por grandes diques e pequenas soleiras. Ocorre mais frequentemente na porção centro-leste da Bacia do Parnaíba e acompanha o eixo NE-SW do Lineamento Transbrasiliano (Chamani & Riccomini, 2015).

Segundo Oliveira *et al.* (2003), as rochas da Formação Sardinha consistem majoritariamente em diabásios porfiríticos esverdeados a cinza e raramente basaltos pretos e afaníticos. São encontrados olivina, augita, plagioclásio, clinopiroxênio e óxidos de Fe-Ti em maior concentração, e vidro vulcânico, diopsita, pigeonita, apatita, pirita e calcopirita em menor quantidade. Ocorre também anfibólio, epídoto e mica branca, em substituição ao clinopiroxênio e ao plagioclásio.

Segundo Oliveira *et al.* (2003), essa formação é dividida em rochas toleíticas alcalinas de alto-Ti e baixo -Ti (diabásio/gabro rico em olivina ou basalto rico em olivina). Assim como na Formação Mosquito, encontram-se elementos traço e características isotópicas que se associam a reservatórios de manto enriquecido (Oliveira *et al.*, 2003).

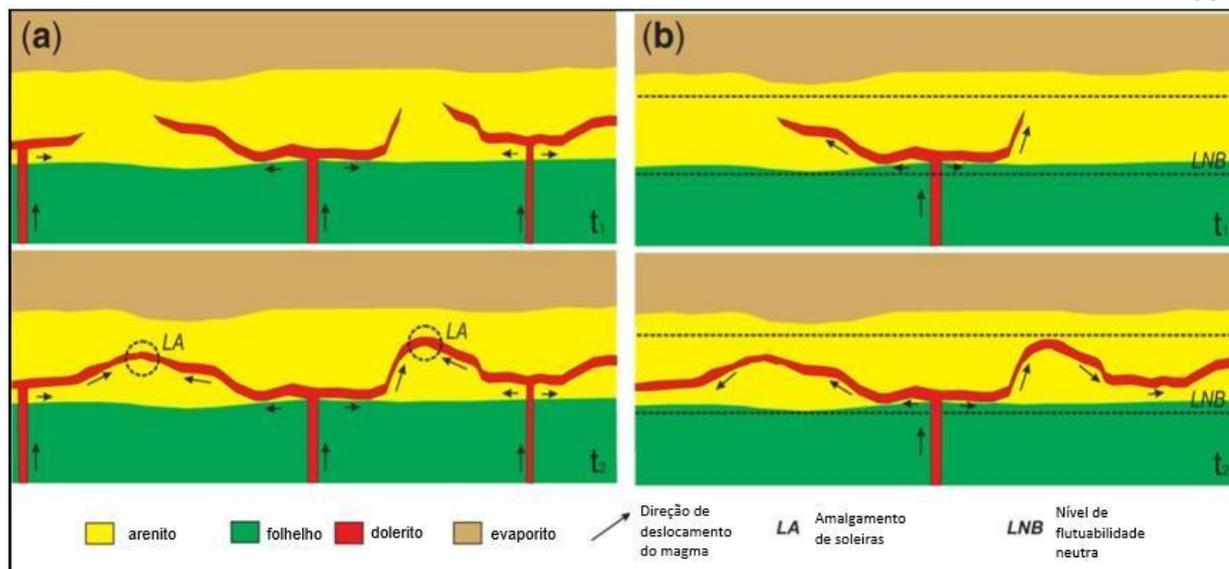
### 3.4.3. Sistemas Petrolíferos

Os eventos magmáticos presentes nas bacias sedimentares brasileiras têm mostrado grande importância na origem dos hidrocarbonetos. O magmatismo pode ser responsável pela geração de petróleo, uma vez que atua diretamente no

aumento da temperatura da bacia no entorno da intrusão, produzindo o aquecimento necessário para a maturação da matéria orgânica. Ainda, pode exercer papel de rochas reservatório e selante, na ausência de estruturas convencionais, formar trapas responsáveis pela acumulação de hidrocarbonetos e favorecer a estruturação da bacia para a migração do gás (Rodrigues, 1995; Thomaz Filho *et al.*, 2008; Miranda *et al.*, 2018).

Estudos utilizando dados de reflectância de vitrinita (%Ro) constataram que, na Bacia do Parnaíba, o efeito térmico do magmatismo foi essencial para a maturação da matéria orgânica e consequente geração de hidrocarbonetos. Os altos valores de %Ro associados às intrusões evidenciam a ocorrência de um sistema petrolífero atípico com potencial exploratório para gás (Fernandes, 2011).

Os principais sistemas petrolíferos da Bacia do Parnaíba na região do Parque dos Gaviões são: Pimenteiras – Cabeças (!) e Pimenteiras – Poti (!). A partir de dados sísmicos e de poço, Miranda *et al.* (2018) separou dois grupos principais de soleiras na porção central da bacia, em que o mais profundo ocorre nos folhelhos da Formação Pimenteiras e foi fundamental para a geração de gás (Figura 10). O selo mais eficiente nesta bacia é formado por intrusões de diabásio que podem selar qualquer reservatório, independentemente de sua posição estratigráfica (Araújo, 2017). Nesse contexto, a exploração de hidrocarbonetos na Bacia do Parnaíba tem se concentrado no sistema ígneo, uma vez que as soleiras atuam como geradoras de calor para os folhelhos ricos em matéria orgânica da Formação Pimenteiras e funcionam como selo e trapa, acima do reservatório de gás da Formação Poti, gerada pelo amalgamento de duas ou mais soleiras ou devido a sua extensão lateral (Trosdorf Junior *et al.*, 2014; Araújo, 2015; Miranda *et al.*, 2018).



**Figura 10:** Secção transversal geológica esquemática de possíveis mecanismos de formação de trapas: (a) alimentadores múltiplos de diques para emplacamento de soleiras ( $t_1$ ) e amalgamento de membros ( $t_2$ ); e (b) alimentador único de diques para emplacamento de soleiras ( $t_1$ ) e variação no nível de emplacamento de soleiras ao longo de um nível de fluabilidade neutra. Fonte: Modificado de Miranda *et al.*, 2018.

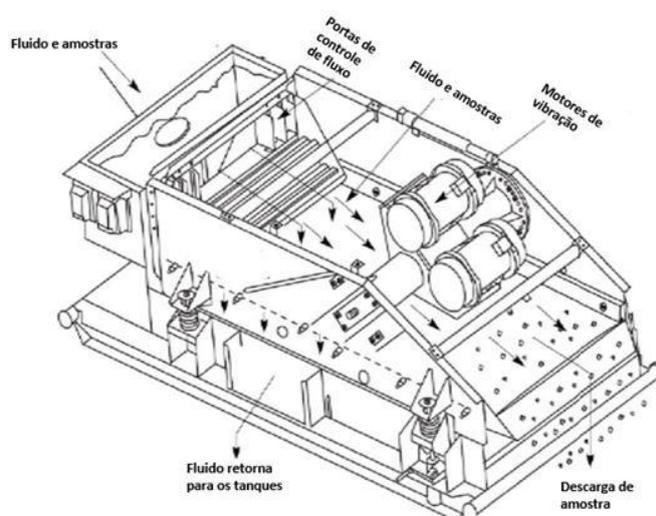
## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho apresenta a associação de dados utilizados durante a operação geológica em poços de petróleo, correlacionando amostras de calha, análises de fluorescência de raios-X, difração de raios-X e perfis de poço, cujos conceitos teóricos individuais são estruturados a seguir.

### 4.1 Amostras de calha

As amostras de calha constituem o material básico na perfuração de um poço para auxiliar a equipe de exploração (IBP/PETROBRAS, 1981). São fragmentos de rocha obtidos pelo trabalho da broca durante a perfuração do poço, chegando à superfície pela circulação do fluido de perfuração (ANP, 2015). Esse material é obtido a partir da mistura desses fragmentos cortados de modo que intervalo represente 9 metros, reduzindo para 3 metros nos intervalos de interesse exploratório, podendo apresentar fragmentos relativos ao fluido ou equipamentos de perfuração (ANP, 2015; De Oliveira *et al.*, 2022).

Uma quantidade representativa das amostras é coletada a partir dos fragmentos acumulados na extremidade das peneiras de lama (Figura 11). As amostras de calha passam por telas vibratórias para separar os cascalhos da lama. À medida que a amostra viaja pelas telas, o resto de fluido cai pela malha, enquanto os sólidos viajam até o final da tela, onde são coletadas (Morton-Thompson & Woods, 1993).



**Figura 11:** Esquema representativo da peneira de lama, com o local de coleta das amostras. Fonte: modificado de Donovan, 2019.

A amostragem de calha é essencial na fase de exploração e através da sua descrição é possível identificar os diferentes tipos litológicos, o conteúdo fossilífero, potenciais geradores e indícios de hidrocarbonetos, auxiliando na caracterização das formações do poço, suas espessuras, seus respectivos contatos e identificar possíveis zonas de acumulação de hidrocarbonetos (IBP/PETROBRAS, 1981). Além disso, esse dado é essencial para a construção e interpretação da formação e evolução do sistema petrolífero de uma bacia sedimentar (IBP/PETROBRAS, 1981).

Tendo em vista algumas circunstâncias inerentes à perfuração do poço, como: intenso contato do material com o fluido e com os equipamentos de perfuração, e ocorrência de materiais desabados (desmoronamento) de camadas anteriormente perfuradas, as amostras podem ser contaminadas e, com isso, deixar de representar exatamente as profundidades referidas. Os desmoronamentos ocorrem a depender da profundidade, do tempo de perfuração, das variáveis hidrodinâmicas ocasionadas pelas propriedades tixotrópicas e pressão de bombeio do fluido de perfuração (Nery, 2004).

Durante a perfuração do poço circula fluido de perfuração, que são compostos empregados para auxiliar as operações de perfuração, desempenhando diversas funções como: exercer pressão hidrostática suficiente para a estabilização da parede do poço, resfriar e lubrificar a broca, carrear os cascalhos até a superfície, entre outros (Nery, 2004).

Esses compostos são misturas de sólidos e líquidos classificados de acordo com sua parte líquida, que pode ser à base de água, óleo, gás ou sintéticos, sendo os últimos aplicados apenas em situações severas de perfuração. Os poços utilizados neste trabalho foram perfurados apenas com fluidos base óleo. Já as partes sólidas possuem diversas funções como viscosificantes, inibidores de hidratação de argila, emulsionantes, alcalinizantes, adensantes, entre outros, sendo compostas principalmente por goma xantana, bentonita, cloretos de sódio e potássio, aminas, cal hidratada, soda cáustica, baritina, carbonato de cálcio, entre outros (Rocha *et al.*, 2006 *apud* De Oliveira, 2023).

A lavagem dessas amostras é uma etapa importante, a fim de eliminar materiais indesejados oriundos da perfuração do poço, principalmente o excesso de fluido de

perfuração que se agrega ao fragmento. Um dos problemas encontrados no processo de lavagem é que, em excesso, no caso de amostras argilosas, pode prejudicar a estimativa da porcentagem da argila, subestimando-a (Nobre, 2019).

O controle de qualidade das amostras de calha é importante visto que diversas análises são feitas a partir dessas amostras, como análises de fluorescência e difração de raios-X, que podem ser feitas durante ou após a perfuração do poço, com o intuito de melhor entender o comportamento químico e mineralógico dessas amostras ao longo da seção perfurada (Calonio, 2020; Saibro, 2020; Ribeiro, 2021; Oliveira, 2022; De Oliveira, 2023).

## 4.2 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica analítica utilizada para determinar a composição química de uma ampla variedade de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pastas e pós soltos, sendo capaz de identificar de forma qualitativa ou quantitativa elementos maiores, menores e traços (Klein & Dutrow, 2012; De Oliveira *et al.*, 2022).

A fluorescência de raios-X se baseia na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas como elétrons, prótons ou íons produzidos através de tubos de raios-X (Santos *et al.*, 2013).

Nos últimos anos essa técnica tem sido aplicada, junto ao método de difração de raios-X, em amostras de calha para determinação da litologia (De Oliveira *et al.*, 2018), sendo possível correlacionar alguns elementos a mudanças na composição da rocha (Zhang *et al.*, 2019 *apud* De Oliveira *et al.*, 2022).

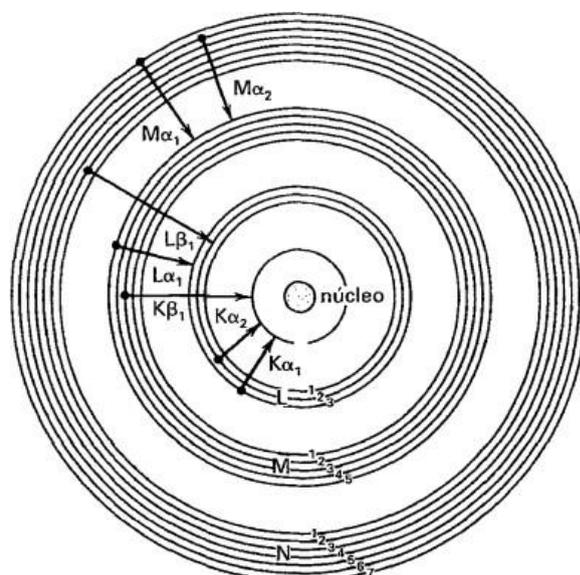
A espectrometria de FRX utilizada neste trabalho se baseia no princípio de dispersão de energia (EDFRX), em que os átomos absorvem um feixe de raios-X e emitem uma abundância relativa de fótons característicos de cada elemento químico (Wirth *et al.*, 2009; Weltje & Tjallingii, 2008 *apud* Oyedotun, 2018), identifica o elemento e sua intensidade, permitindo que seja medida sua concentração na amostra analisada mediante uma prévia calibragem (Ferretti, 2009).

Os equipamentos de fluorescência de raios-X, genericamente, possuem um tubo gerador de raios-X, um porta amostras e um detector de raios-X. Segundo

Nascimento Filho (1999), o método de análise por FRX consiste em três etapas: produção de raios-X para excitação dos átomos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X.

A produção de raios-X ocorre no momento em que elétrons são acelerados no interior do tubo gerador de raios-X, gerando ondas de alta frequência e baixo comprimento, que são emitidos pelo tubo e colidem com o alvo, transferindo energia e instabilizando (ionizando) os átomos da amostra (Born, 1969).

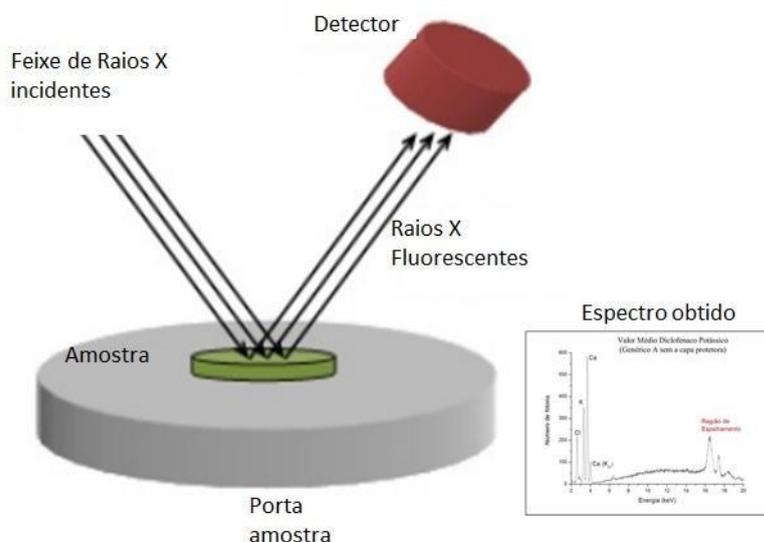
Nesses processos (Figura 12), os elétrons das camadas mais internas (K e L) são excitados e ejetados, deixando uma vacância, que é rapidamente preenchida pelos elétrons das camadas mais externas (Nascimento Filho, 1999).



**Figura 12:** Ilustração esquemática da produção do espectro de raios-X característicos K e L como resultado de um decaimento em cascata de elétrons do nível de energia superior para um mais inferior na estrutura atômica. Fonte: Klein & Dutrow, 2012.

Cada transição eletrônica constitui uma liberação de energia emitida na forma de fótons (fluorescência ou raios-X característicos), específicos de cada elemento químico constituinte das amostras (Nascimento Filho, 1999). A fluorescência emitida nesse processo é medida por um detector de energia dispersiva, que separa a radiação proveniente da amostra em radiações características de cada elemento químico, sendo a intensidade dessa energia relacionada com a concentração de cada elemento na amostra (Santos *et al.*, 2013).

Como resultado, obtêm-se o espectro contínuo, que é uma curva de contagens por segundo versus energia (KeV), que traduz o ponto em que a energia foi suficiente para remover completamente um dos elétrons do alvo, emitindo fótons (Warren, 2012). Dessa forma, a análise por FRX mede a característica e a intensidade desses fótons, permitindo identificar e quantificar os elementos baseado nos espectros da fluorescência de raios-X. A Figura 13 mostra o esquema interno de um equipamento de FRX.



**Figura 13:** Esquema de excitação e detecção de raios-X utilizado pelos equipamentos de fluorescência de raios-X por dispersão de energia. Fonte: Modificado de Luiz et al., 2014.

### 4.3 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-X (DRX) é uma técnica aplicada para identificação mineral através de estruturas cristalinas, na qual os planos cristalográficos fazem com que um feixe de raios-X incidente difrate em muitas direções específicas. Corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, sendo aplicada em diversos campos de conhecimento, para identificação e quantificação de fases cristalinas (Kahn, 2002).

Os minerais possuem uma estrutura tridimensional ordenada com periodicidades características ao longo dos eixos cristalográficos. A medição dos raios-X difratados permitem informações sobre a geometria do cristal, mais especificamente sobre os comprimentos das arestas e os ângulos entre elas. As

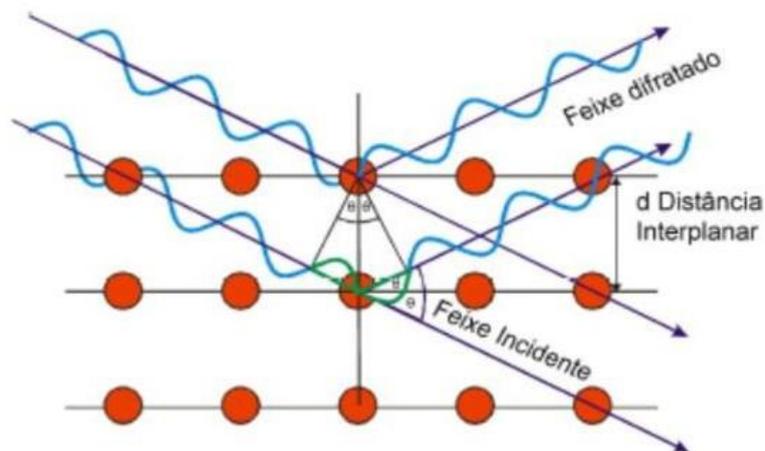
direções de incidência dos raios-X nos cristais são definidas pelos seus planos cristalinos, que são descritos segundo os índices de Miller  $hkl$  (Cullity, 1978; Klein & Dutrow, 2012). Planos cristalinos com diferentes índices possuem diferentes distâncias interplanares ( $d$ ), que por sua vez, são parâmetros que caracterizam uma substância cristalina qualquer, de maneira que um conjunto de valores  $d$  em um difratograma identifica um mineral.

Quando um feixe de raios-X atinge um arranjo ordenado, seus elétrons absorvem parte da energia dos raios-X e atuam como frentes de onda, espalhando essa energia como radiação X de mesma frequência e comprimento de onda. Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração dos raios-X podem ser observados em vários ângulos (Sasaki & Bleicher, 2000; Silva, 2009; Klein & Dutrow, 2012).

O fenômeno da difração ocorre a partir de uma família de planos paralelos somente sob certas condições, que devem satisfazer as condições geométricas expressas na Lei de Bragg (Equação 1). Para um dado espaçamento interplanar ( $d$ ) e um dado comprimento de onda ( $\lambda$ ), os máximos de difração ocorrem somente nos ângulos  $\theta$  que satisfazem a equação. Uma vez satisfazendo a Lei de Bragg, a intensidade de um máximo de difração (pico de difração) é dependente do número de elétrons no átomo (Cullity, 1978, Klein & Dutrow, 2012).

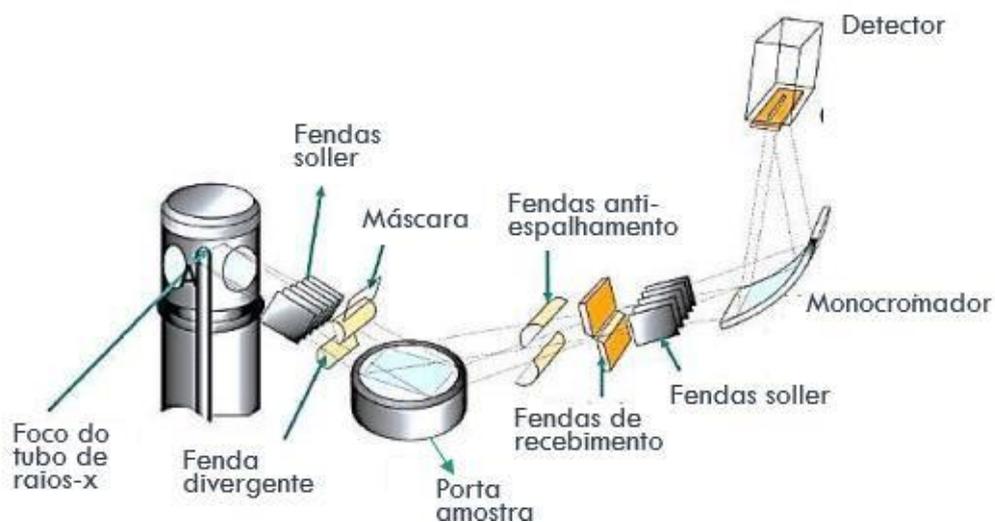
$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad \text{(Equação 1)}$$

A Figura 14 esquematiza o fenômeno da difração de raios-X, representando um conjunto de planos cristalinos sob os quais é incidida uma radiação x de comprimento de onda conhecido.



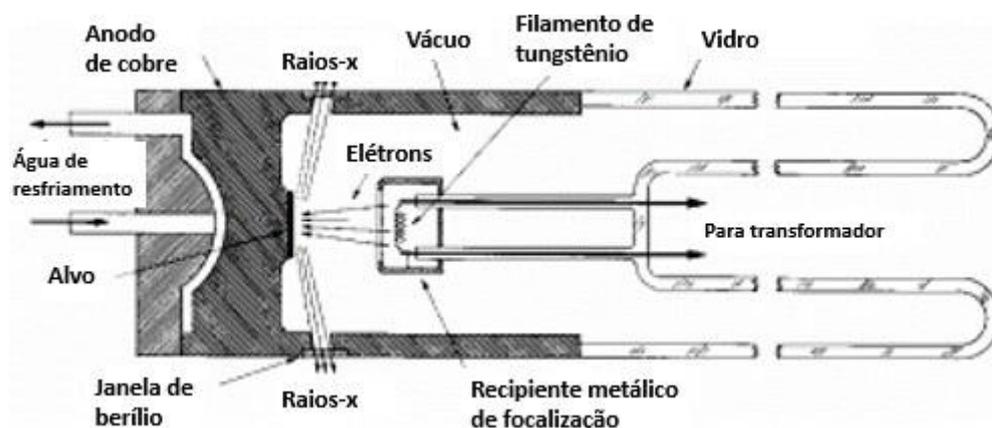
**Figura 14:** Geometria da refração de raios-X de planos igualmente espaçados em uma estrutura cristalina com espaçamento  $d$  entre elas. Fonte: Campos Junior, 2014).

O equipamento utilizado nesse trabalho é o difratômetro baseado na análise pelo método do pó, voltado ao estudo de materiais policristalinos, amplamente usado nos centros de pesquisas, universidades e indústrias. Nos difratômetro de pó, quando o feixe emitido pelo tubo gerador de raios-X atravessa um conjunto de fendas e irradia na superfície da amostra, todas as difrações possíveis ocorrem simultaneamente. Os raios difratados convergem para outro conjunto de fendas, responsável por captar a radiação proveniente da amostra em direção ao detector (Jenkins, 1989). A representação esquemática do funcionamento de um difratômetro de pó é ilustrada na Figura 15.



**Figura 15:** Representação esquemática do equipamento de difração de raios-X no método do pó. Fonte: Modificado de Gobbo 2010.

O tubo gerador de raios-X (Figura 16) pode apresentar diversos materiais como anodo. A seleção do tipo de ânodo está relacionada principalmente com a natureza do material a ser analisado, buscando-se sempre a conjugação ânodo / amostra que apresente o menor coeficiente de absorção de massa, além da relação resolução X intensidade dos picos do difratograma. Já a seleção do tipo de tubo e do foco a ser empregado (linha ou ponto) está relacionado à aplicação a ser efetuada (Kahn, 2002).



**Figura 16:** Tubo gerador de raios-X de um equipamento de DRX. Fonte: Kahn, (2002).

A radiação incidente na amostra promove fenômenos de difração, espalhamento e fluorescência, como a técnica utiliza apenas as radiações difratadas, um conjunto de fendas e filtros é aplicado, a fim de reduzir ruídos nos difratogramas (Gobbo, 2010). Todas as fendas têm a função de limitar as divergências dos feixes (de incidência e difratado) fora do círculo de focalização do difratômetro. O uso do conjunto de fendas adequado é importante, visto que a intensidade e resolução ótimas do pico difratado são obtidas quando a largura do feixe é próxima da largura das fendas (Antoniassi, 2010).

Nos difratômetros pelo método do pó, a captação do raio difratado é feito por meio do detector segundo um arranjo geométrico entre o tubo gerador de raios-X e a amostra, conhecido como a geometria parafocal Bragg-Bretano (Jenkins, 1989). Esses arranjos geométricos podem ser através de um goniômetro horizontal ( $\theta$ - $\theta$ ) ou vertical ( $\theta$ - $2\theta$ ), sendo o  $\theta$ - $\theta$  o utilizado neste trabalho. Na geometria  $\theta$ - $\theta$  o ângulo de incidência varia devido ao movimento realizando tanto pela fonte de raios-X como pelo detector de modo que o porta amostra é estático. Este movimento também é acoplado de forma que ambos se movem com mesma velocidade em  $\theta$  (Magalhães, 2014).

No detector, o feixe difratado é detectado e transformado em forma de contagem de pontos, expresso através de picos que se destacam do background, registrados em um gráfico de intensidade versus ângulo  $2\theta$  (ou  $d$ ), constituindo o difratograma. Cada pico do difratograma fornece a intensidade, a posição angular ( $2\theta$ ) e a distância entre os planos cristalográficos ( $d$ ), que são parâmetros específicos de cada cristal, permitindo, com isso, identificar os minerais presentes em casa amostra.

É importante levar em consideração alguns fatores que influenciam no padrão de reflexão dos raios-X, relacionados a fatores instrumentais e ao preparo das amostras, podendo alterar a posição, forma e tamanho dos picos.

Os principais interferentes instrumentais estão relacionados ao desalinhamento do equipamento e ao uso de fendas e comprimento de onda inadequados. Antoniassi (2010) destaca que escolha inadequada do comprimento de onda usado na radiação pode ocasionar alterações no background, bem como perda de resolução e intensidade de picos de fases cristalinas que não condizem com tal comprimento de onda. O comprimento de onda utilizado na radiação deve ser adequado para o tipo de material a ser analisado (da ordem de grandeza das distâncias interplanares) para que haja interferências construtivas que satisfaçam a Lei de Bragg.

Segundo Fagundes (2018), a fluorescência secundária emitida pelos componentes da amostra e o fator de polarização também afetam a resposta do difratograma. O primeiro, aumenta a intensidade de background, distorcendo a relação pico/linha base e o segundo, divide em duas direções o raios-X que passa na amostra, causando diminuição de intensidade dos picos.

Além de problemas de natureza instrumental, algumas características intrínsecas à amostra também podem afetar o padrão do difratograma. Nesse caso, destacam-se a existência de material amorfo que ocasiona o arqueamento do background, dificultando a observação de picos pouco intensos e a orientação preferencial, que é a tendência dos cristalitos de apresentarem planos paralelos à superfície do porta amostra e levar a alteração das intensidades das reflexões (Fagundes, 2018). A etapa de fixação da amostra pode intensificar a orientação preferencial do material e, para minimizar esse efeito, é utilizada a metodologia *backloading*, onde a prensagem é efetuada do lado oposto a face analisada (Jenkins, 1996; Fagundes, 2018).

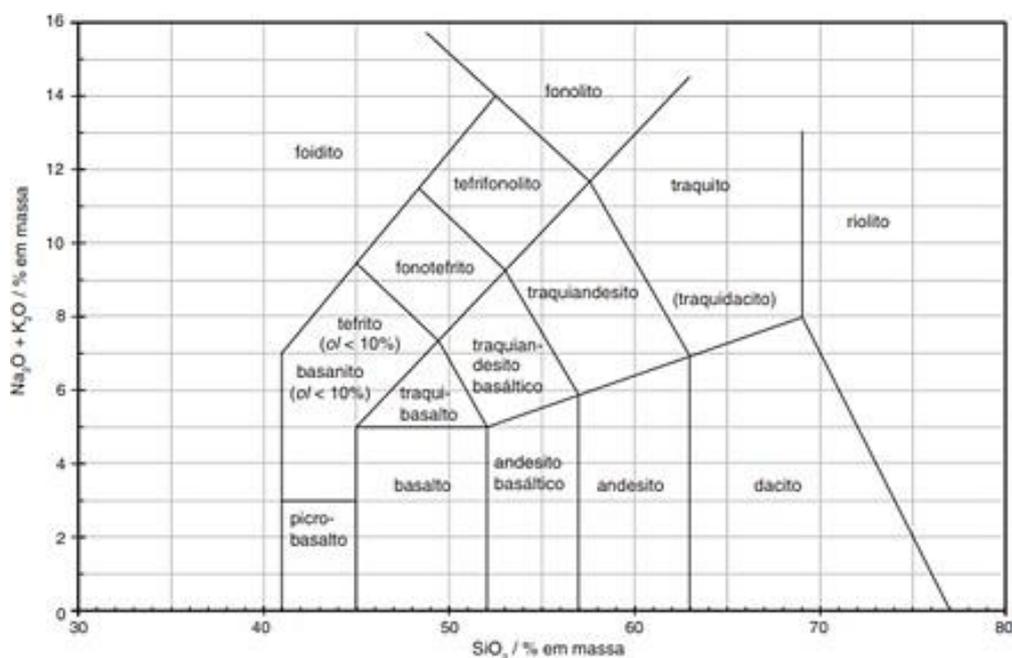
A maior fonte de erros que afeta os difratogramas está relacionada ao preparo das amostras, sendo as principais: superfície das amostras não adequadas à altura do porta amostra, amostras não planas e com rugosidade, moagem excessiva dos grão, amostras pouco pulverizadas e orientação preferencial durante a fixação da amostra no porta amostra (Klug e Alexander, 1974; Jenkins, 1989). Apesar da maioria dos softwares utilizados na interpretação e quantificação do difratograma apresentarem correções matemáticas para reduzir os efeitos da orientação preferencial, é sugerido adotar procedimentos de preparo que reduzam os eliminem esse problema (McCusker *et al.*, 1999; Scardi & Mittemeijer, 2004).

#### 4.4 Rochas ígneas

As rochas ígneas podem ser classificadas de acordo com o tamanho dos cristais, textura, composição mineralógica e conteúdo de sílica (Gill, 2010). O tamanho dos cristais é relevante para a classificação das rochas, dividindo-as em: plutônicas, com cristais maiores que 3mm; sub-vulcânicas, com cristais entre 1 e 3mm; vulcânicas, com cristais menores que 1mm. A textura reflete o modo de cristalização das rochas, sendo as afaníticas associadas a um rápido resfriamento magmático e as faneríticas ao lento resfriamento, com formação de cristais visíveis a olho nu. A composição mineralógica pode ser máfica (rico em ferro e magnésio), félsica (rica em silício e alumínio) e intermediário (proporção equilibrada de minerais máficos e félsicos). A composição química é expressa pelo percentual de SiO<sub>2</sub>, classificando as rochas vulcânicas em ácidas, intermediárias, básicas e ultrabásicas (Le Maitre *et al.*, 2002; Gill, 2010).

Os basaltos, diabásios e gabros são rochas de composição química e mineralógica similar, porém com granulometria e textura diferentes. Essas rochas apresentam composição máfica, com grande ocorrência de minerais ferromagnesianos e baixo teor de sílica, sendo os basaltos classificados como rochas vulcânicas, os diabásios os correspondentes sub-vulcânicos e os gabros os correspondentes plutônicos. Os diabásios são rochas compostas essencialmente por plagioclásio cálcico e clinopiroxênio, principalmente augita, podendo apresentar como minerais acessórios ortopiroxênio, olivina, cromita, titanita, ilmenita, apatita (Cox *et al.*, 1979; Winter, 2001; Le Maitre *et al.*, 2002; Gill, 2010, Sgarbi, 2012).

As rochas ígneas vulcânicas, devido ao diminuto tamanho de seus cristais, são usualmente classificadas a partir de análises químicas, sendo o diagrama álcalis totais x sílica (TAS) o recomendado, que classifica essas rochas a partir de suas concentrações de  $\text{SiO}_2$  que representa a acidez da rocha e consequentemente sua evolução magmática, e da soma das concentrações de  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  que representa a alcalinidade da rocha (Le Maitre *et al.*, 2002; Gill, 2010). Vale ressaltar que a composição do magma pode evoluir após a sua formação, seja por cristalização fracionada, contaminação ou mistura com outros magmas (Bowen, 1922; Gill, 2010) (Figura 7).



**Figura 17:** Diagrama TAS mostrando os campos para os tipos de rochas ígneas. Fonte: Modificado de Gill, 2010.

Outro diagrama utilizado para classificação das rochas ígneas é o diagrama de Pearce, que utiliza os elementos de menor mobilidade química, correlacionando a razão  $\text{Nb/Y}$  com a razão  $\text{Zr/TiO}_2$ . A razão  $\text{Nb/Y}$  constitui um indicador de alcalinidade dos magmas e a razão  $\text{Zr/TiO}_2$  aumenta com a diferenciação progressiva de magmas básicos e, por isto, pode ser usada como um índice de diferenciação magmática no lugar da concentração de Si (Pearce & Cann 1973, Pearce *et al.*, 2014).

As rochas ígneas intrusivas ocorrem frequentemente na forma de diques e soleiras, podendo variar de alguns centímetros até muitos metros de espessura (Gonçalves, 2010, Gill, 2010). Os diques são caracterizados como corpos verticais ou subverticais, discordantes à rocha encaixante, onde ocorre o transporte do magma

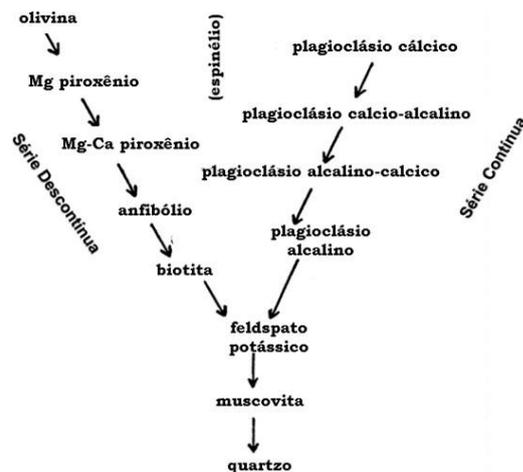
vindo do ambiente plutônico para os ambientes vulcânicos. As soleiras são corpos horizontais concordantes à rocha encaixante, caracterizadas como uma zona de acumulação e estagnação de magma (Jerram & Pertford, 2011).

A composição mineral das rochas e seus elementos químicos podem fornecer informações sobre as condições físico-químicas vigentes durante a cristalização dos magmas (Sial & McReath, 1984).

#### **4.5 Minerais formadores de rochas ígneas e a Série de Bowen**

O magma, após sua geração, inicia um processo lento e contínuo de resfriamento e cristalização dos minerais. As rochas magmáticas podem apresentar uma grande diversidade de características no que diz respeito à textura e à composição química e mineralógica, definidas pelas diferentes condições de temperatura e pressão as quais os minerais se cristalizam. Essas propriedades caracterizam as rochas ígneas e trazem informações sobre sua gênese, ocorrência e estrutura (Sial & McReath, 1984).

O modelo da série de reações de Bowen (Figura 18) mostra que os minerais se cristalizam em temperaturas distintas, sendo os minerais de maior ponto de fusão os primeiros a cristalizar, seguidos dos demais, em ordem decrescente do ponto de fusão (Bowen, 1922; Jerram & Pertford, 2011; Tarbuck & Lutgens, 2012). A extremidade inferior da escala de temperatura, onde todos os minerais encontram-se cristalizados em rocha sólida, é de aproximadamente 500 °C e a extremidade superior da faixa, onde todos os minerais coexistem em um estado fundido, é de aproximadamente 1.500 °C (Bowen, 1922).



**Figura 18:** Esquema ilustrativo da série de Bowen. Fonte: Modificado de Bowen (1922) apud De Oliveira (2023).

Os diferentes minerais cristalizam sistematicamente do magma e a composição do magma muda continuamente durante o processo de cristalização. Isso ocorre pois, à medida que os cristais se formam, eles removem, seletivamente, elementos do magma, que fica deficiente desses elementos (Bowen, 1922; De Lima, 2020).

A Série de Bowen apresenta duas séries distintas: a descontínua e a contínua. Na série de descontínua, os minerais formados inicialmente são substituídos por cristais mais estáveis com a diminuição da temperatura e mudança na composição magmática. O processo se inicia com a cristalização da olivinamagnésiana e conforme o magma se resfria e empobrece em magnésio, inicia-se a cristalização do ortopiroxênio. Com o contínuo arrefecimento do magma, atinge-se a temperatura de cristalização do clinopiroxênio, anfibólio e biotita (Bowen, 1922; Sial & McReath, 1984). Após o término da cristalização da biotita, o magma residual não possui mais ferro nem magnésio, cristalizando os minerais ricos em sílica (Bowen, 1922).

A série de reação contínua é formada unicamente por plagioclásios, constituídos quimicamente por alumínio, silício e quantidades variáveis de cálcio e sódio. Os íons de cálcio e sódio podem se substituir, formando uma série isomórfica, entretanto o sódio e o cálcio não apresentam a mesma valência e precisam de uma compensação de carga para se substituírem, sendo assim, os plagioclásios cálcicos apresentam um teor mais elevado de alumínio enquanto os sódicos são menos ricos em alumínio. O primeiro plagioclásio a cristalizar é a anortita, rica em cálcio e alumínio, e conforme a temperatura do magma diminui, o cristal incorpora mais sódio em sua estrutura, formando a albita. Plagioclásios com composições intermediárias também

são formadas, como oligoclásio, andesina, labradorita, entre outros (Bowen, 1922; Sial & McReath, 1984; Luz & Lins, 2005).

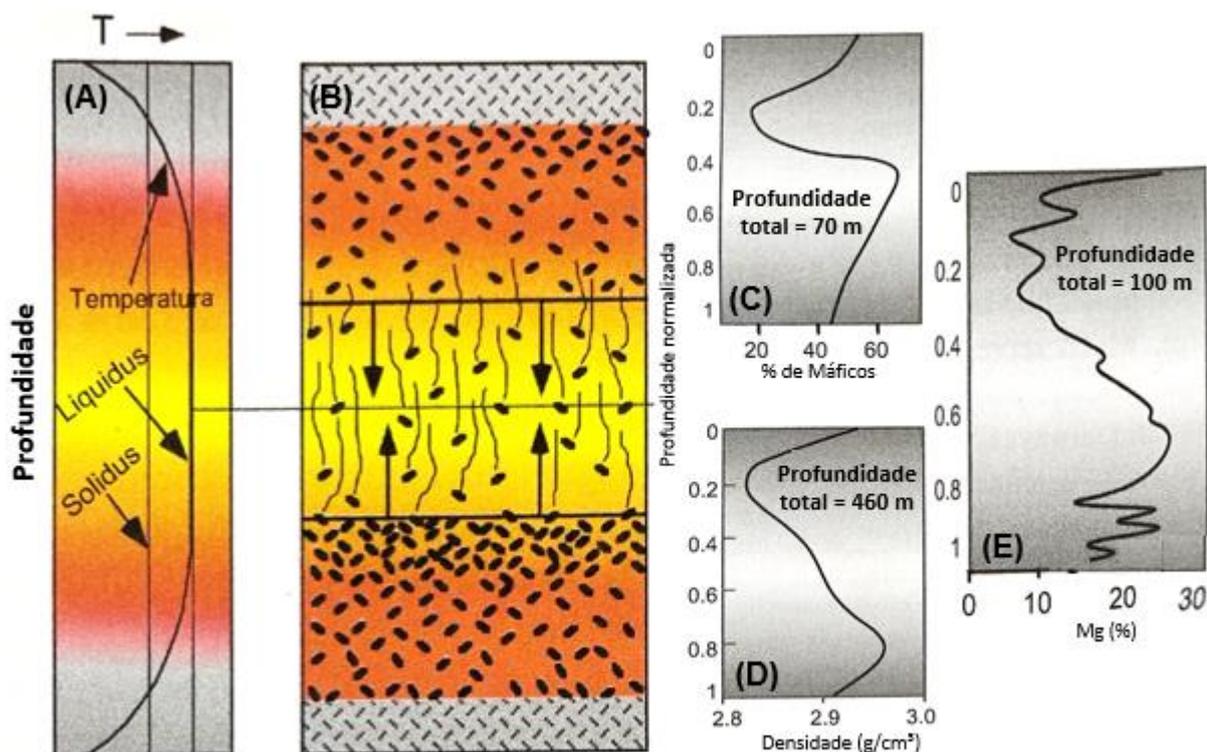
Após a cristalização completa das séries contínua e descontínua, se ainda houver magma residual, ele pode apresentar concentrações de elementos como silício, potássio e alumínio. Nesse caso, cristalizam os feldspatos potássicos, muscovitas e quartzos, até que não haja mais magma residual (Bowen, 1922; Gill, 2010).

#### **4.6 Processo de cristalização magmática**

O processo de cristalização magmática respeita a série de Bowen, em que na série descontínua o mineral formado reage com o líquido magmático residual, dando origem ao mineral seguinte da sua série e na série contínua os cristais existentes mudam progressivamente sua composição através da troca contínua com o resíduo local (Marsh, 2015).

Segundo Marsh (2015), o acúmulo dos primeiros cristais formados começa a gerar uma malha que impede que eles decantem por gravidade. Portanto, a presença de minerais mais densos na base das soleiras ocorreria apenas se o magma já for alocado com fenocristais ou se a soleira receber um novo aporte magmático no início da sua cristalização. Esses processos formam uma diferença composicional entre o topo e a base da soleira, como aumento de minerais máficose ricos em magnésio na base. Marsh (2015) sugere que o aumento da concentração de magnésio pode estar relacionada à presença de ortopiroxênio ou olivina magnesiana.

A cristalização das intrusões se inicia da borda para o centro, criando uma zona de diferenciação magmática na porção central, devido ao acúmulo de elementos incompatíveis, formados no último estágio de cristalização magmática, explicado no esquema da Figura 19 (Marsh, 2015). Esse modelo de cristalização é observado na Bacia do Parnaíba através de estudos petrográficos e litogeoquímicos, que mostram que as bordas das intrusões dessa bacia apresentam granulação fina, enquanto no interior do corpo há um aumento gradual na granulação dos cristais. Os maiores cristais coincidem com a porção onde a curva de GR alcança seus valores mais elevados (Trosdorf Junior *et al.*, 2014).



**Figura 19:** Esquema mostrando, em (A): a variação da temperatura com dentro das soleiras; em (B): a cristalização em uma soleira, da borda para o centro e a concentração de cristais; em (C): variação da concentração de minerais máficos em relação à profundidade; (D): variação da densidade com relação à profundidade; (E) concentração de Magnésio ao longo da profundidade. Quando há presença de fenocristais ou novo aporte magmático, este processo apresenta uma variação composicional entre o topo a base. Fonte: Marsh, 2015 *apud* De Oliveira, 2023.

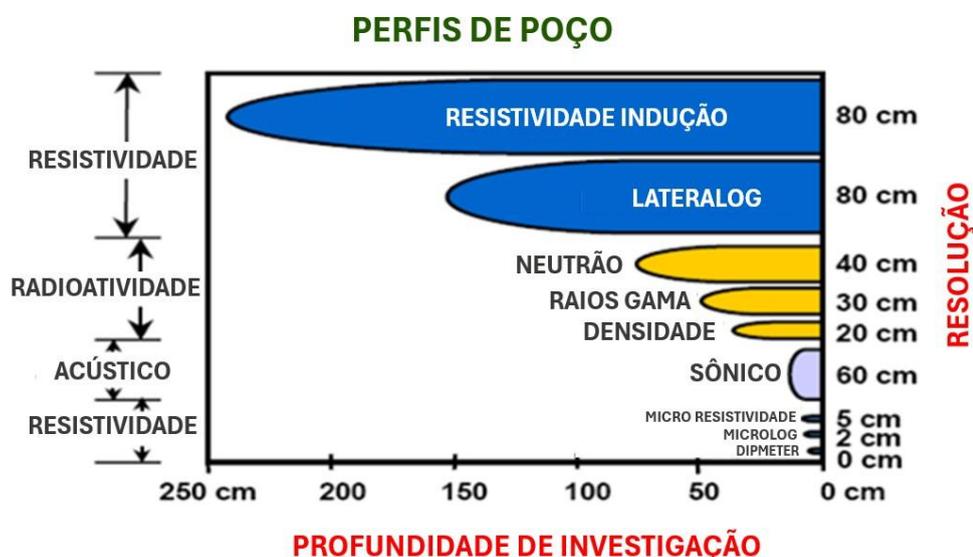
#### 4.7 Perfis Geofísicos de Poços

Os perfis de poço são medidas indiretas das características petrofísicas das formações rochosas ao longo da profundidade do poço (Rider, 2002; Ellis & Singer, 2008). Quando adquiridos após a perfuração são chamados de Wireline (WL), onde as informações são transmitidas por um sistema de cabos elétricos, independentes do sistema de perfuração. Quando adquiridos durante a perfuração são chamados de Logging While Drilling (LWD), onde os dados são transmitidos por pulsos que se propagam em tempo real até a superfície através do fluido de perfuração no interior da coluna (Bates & Jackson, 1980; Craveiro, 2013; Ellis & Singer, 2008).

A interação entre o fluido de perfuração e as rochas da formação bem como as irregularidades na parede do poço podem afetar a resposta de algumas ferramentas. Para minimizar esses problemas, são realizadas correções ambientais

básicas para cada perfil após a aquisição dos dados (Ellis & Singer, 2008).

Atualmente existe uma grande variedade de perfis de poços, utilizados para auxiliar no conhecimento das propriedades petrofísicas e geológicas do poço, tais como: litologia, porosidade, permeabilidade, saturação de fluidos, argilosidade, entre outras. Também são utilizados na obtenção de informações relativas aos fluidos contidos nas formações geológicas, na identificação de zonas produtivas de hidrocarbonetos, na distinção do tipo de hidrocarboneto e na estimativa das suas reservas (Craveiro, 2013). A Figura 20 correlaciona a resolução vertical de cada ferramenta a cabo com sua respectiva profundidade de investigação.



**Figura 20:** Gráfico relacionando a resolução vertical com a profundidade de investigação de cada ferramenta (Modificado de Bond et al., 2010).

Os perfis de poços podem indicar variações composicionais nas rochas ígneas, sugerindo sua origem e evolução (Ran *et al.*, 2014; Jerram *et al.*, 2019). Neste trabalho, os perfis foram usados para identificar e classificar os diques e soleiras, baseado nas metodologias propostas por Trosdorf Junior *et al.*, 2014 e De Oliveira *et al.*, 2018, a partir do comportamento das curvas de GR, RHOZ e PEFZ.

#### 4.7.1 Raios Gama (GR)

O Perfil de GR é uma ferramenta geofísica que mede a radioatividade natural emitida pelas formações rochosas. Praticamente toda a emissão natural de raios gama encontrada nas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares é emitida pelos

isótopos instáveis do potássio (K40) e pelos elementos radioativos da série urânio (U238) - tório (Th232) (Nery, 2004; Rosa, 2006; Ellis & Singer, 2008).

Segundo Nery (2004), o perfil de GR convencional não é capaz de identificar isoladamente todo o espectro energético e, portanto, distinguir os elementos. Por esse motivo, sua detecção corresponde ao somatório de todos os elementos radioativos. Para obtermos os valores individuais de cada série radioativa é necessário recorrer à ferramenta de Espectrometria de Raios Gama. A ferramenta desse perfil é comumente deslocada de forma centralizada no poço e com baixa velocidade, com o intuito de amostrar o maior número de fótons emitidos pela radiação. O diâmetro de investigação dessa ferramenta pode chegar a 50cm, com resolução vertical de 30cm, e sua unidade de medida é o gAPI (American Petroleum Institute) (Silva, 2016). A radioatividade natural pode ser calculada a partir dos teores de Urânio, Tório e Potássio, a partir da Equação 2.

$$\gamma^{(API)} = 4.Th^{(ppm)} + 8.U^{(ppm)} + 16.K^{(\%)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em rochas ígneas, o perfil de GR pode ser correlacionado com o teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) e, em geral, a radioatividade aumenta das rochas básicas para as ácidas (Liu *et al.*, 2013; Zou *et al.*, 2013; Ran *et al.*, 2014). As rochas ígneas apresentam variações quanto aos teores de potássio, urânio e tório, sendo o mais abundante dos três elementos o potássio, o qual é controlado pela presença de feldspatos alcalinos e micas. O Urânio quando presentes em rochas ígneas está associado à absorção orgânica ou hidrotermalismo, enquanto o Tório está relacionado à presença de argilominerais nos interstícios ou nas vesículas das rochas (Ran *et al.*, 2014). O tório e o potássio são associados à diferenciação magmática, por serem elementos incompatíveis, ou seja, só participam da formação de fases cristalinas nos últimos estágios de cristalização magmática (Saunders, 1976 *apud* Souza, 1998; Nery, 2004; Ran *et al.*, 2014; Jerram *et al.*, 2019).

#### 4.7.2 Densidade (RHOZ)

As ferramentas convencionais que adquirem os dados de densidade são compostas por uma fonte radioativa de Césio (Cs<sup>137</sup>) que emite raios gama artificiais, que colidem com os elétrons presentes na formação, provocando o fenômeno conhecido como Efeito Compton. Os raios gama emitidos interagem com os elétrons

dos átomos das rochas e após inúmeras colisões e consequentes perdas de energia, os raios gama retornam para a ferramenta e são contados por detectores localizados no corpo da mesma (Rosa, 2006; Ellis & Singer, 2008). Os raios gama resultantes são proporcionais à densidade *bulk* da formação (Schön, 2011).

Segundo Nery (2004), o Efeito Compton está diretamente relacionado ao número de elétrons presentes na formação, que por sua vez responde diretamente à densidade da formação e inversamente à sua porosidade. Segundo Silva (2016), o perfil RHOZ é sensível a desmoronamento ou à presença de reboco em frente as camadas perfiladas, pois a ferramenta funciona encostada na parede do poço, além da radiação gama emitida pela ferramenta ser atenuada antes de penetrar na rocha. Nesses casos, a ferramenta lê o fluido de perfuração como uma zona porosa, diminuindo o valor de densidade aparente (Ellis & Singer, 2008).

Para rochas ígneas básicas, os valores de densidade tendem a ser elevados, sofrendo um decréscimo nos casos de aumento do volume vesicular (porosidade) e de alteração para argilominerais (Planke, 1994; Zou *et al.*, 2013; Ran *et al.*, 2014; Trosdorf Junior *et al.*, 2014; Jerram *et al.*, 2019; De Oliveira *et al.*, 2023).

#### 4.7.3 Fator Fotoelétrico (PEFZ)

A ferramenta utilizada nesse perfil possui uma fonte radioativa de Césio ( $Cs^{137}$ ) que emite raios gama na formação geológica, interagindo com os elétrons a partir do Efeito Fotoelétrico. Segundo Nery (2004), o Efeito Fotoelétrico ocorre quando os fótons de menor energia interagem com os elétrons orbitais e cedem toda a sua energia para os mesmos, até que o fóton é totalmente absorvido e o elétron se transforma em um fotoelétron livre. Nesse processo, são gerados raios-X característicos, proporcionais ao número atômico de cada elemento químico presente na rocha, fornecendo um valor em barn/elétron (b/e) (Ellis & Singer, 2008).

Essa ferramenta é pouco influenciada pelo fluido contido nas rochas, devido à dificuldade de identificar elementos com baixo número atômico, portanto esse perfil é uma resposta direta à composição química das rochas, atribuindo altos valores de PEFZ para altas densidades. Além disso, imperfeições e arrumbamentos na parede do poço também interferem nas leituras (Ellis & Singer, 2008).

Em um gráfico, picos isolados de índices fotoelétricos podem estar associados

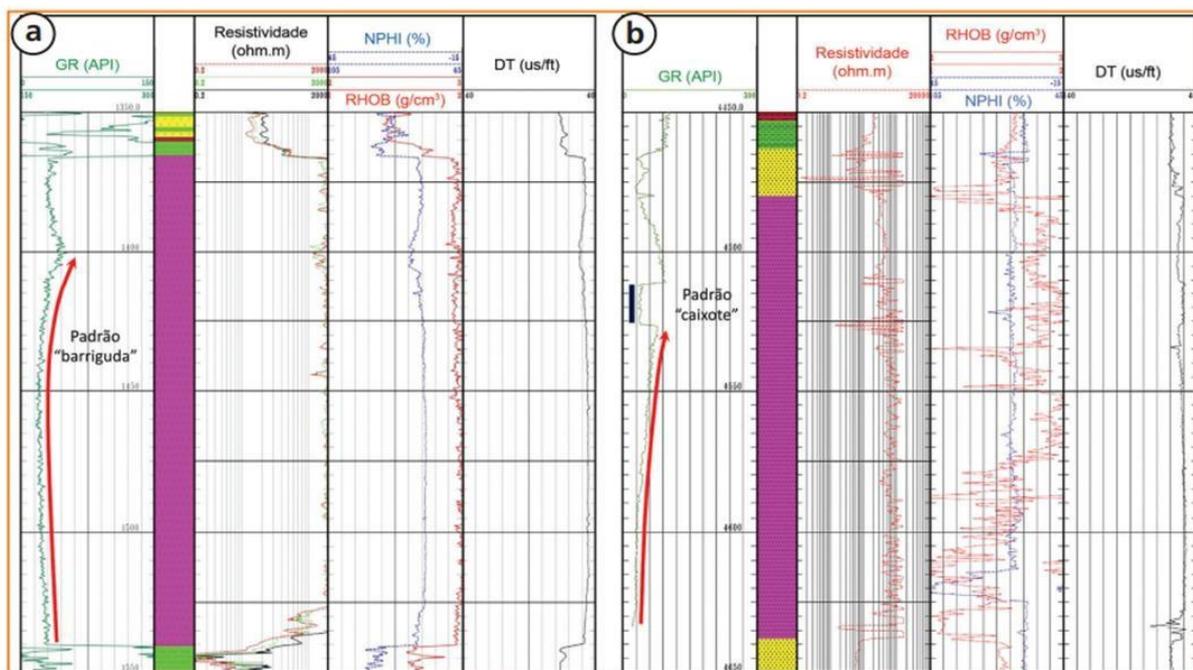
à deposição de metais pesados ou baritina contida no fluido de perfuração preenchendo cavidades, como por exemplo zonas fraturadas ou cavernas em zonas carstificadas em carbonatos (Inanc *et al.*, 2011), podendo afetar os dados e confundir com respostas esperadas para rochas ígneas (De Oliveira *et al.*, 2023).

## 5 Trabalhos prévios

Para identificar e compreender o comportamento das rochas ígneas é necessário utilizar uma grande variedade de ferramentas, devido à sua complexidade composicional e morfológica. Os melhores métodos para identificação dessas rochas são os perfis litogeoquímico e os de imagem acústica e resistiva, que nem sempre estão disponíveis em todos os poços. No entanto, também é possível identificar e caracterizar as rochas ígneas a partir dos perfis de poços convencionais, dado que as eletrofácies trazem informações sobre as rochas, refletindo suas composições mineralógicas, texturais e estruturais (Trosdtorf Junior *et al.*, 2014; Zou *et al.*, 2013; Ran *et al.*, 2014; Fornero, 2018; De Oliveira *et al.*, 2023).

### 5.1 Características das rochas ígneas intrusivas usando perfis de poço

Os corpos ígneos intrusivos na seção sedimentar das bacias apresentam assinatura característica nos mais variados perfis de poço, sendo o perfil de GR um dos mais utilizados para identificação desses corpos (Trosdtorf Junior *et al.*, 2014). As intrusões da Bacia do Parnaíba apresentam feições características de GR, denominadas, por Trosdtorf Junior *et al.*, (2014), como feição “barriguda” e feição “caixote”, fazendo uso da terminologia fornecida por Martins (1991) (Figura 21). Martins (1991) chamou a eletrofácies dessas soleiras de barriguda quando estava grávida da Maíra no início de 1990 e publicou internamente no STOG<sup>1</sup> de Cabo Frio, em 1991. O padrão “barriguda” foi observado por De Oliveira (2023) também na Bacia do Paraná. Na Bacia de Santos, as soleiras apresentam feição “barriguda invertida”, onde o topo e a base apresentam valores maiores de GR e o meio apresenta um valor menor (De Oliveira, 2023).



**Figura 21:** Perfil elétrico de dois poços com intrusivas ígneas identificadas; (a) exemplo de feição típica de soleira na Bacia do Parnaíba., caracterizando o padrão “barriguda”; (b) exemplo de feição típica de dique na Bacia do Paraná, onde o perfil de GR forma o padrão do tipo “caixote”. Fonte: Modificado de Trosdorf Junior *et al.*, 2014.

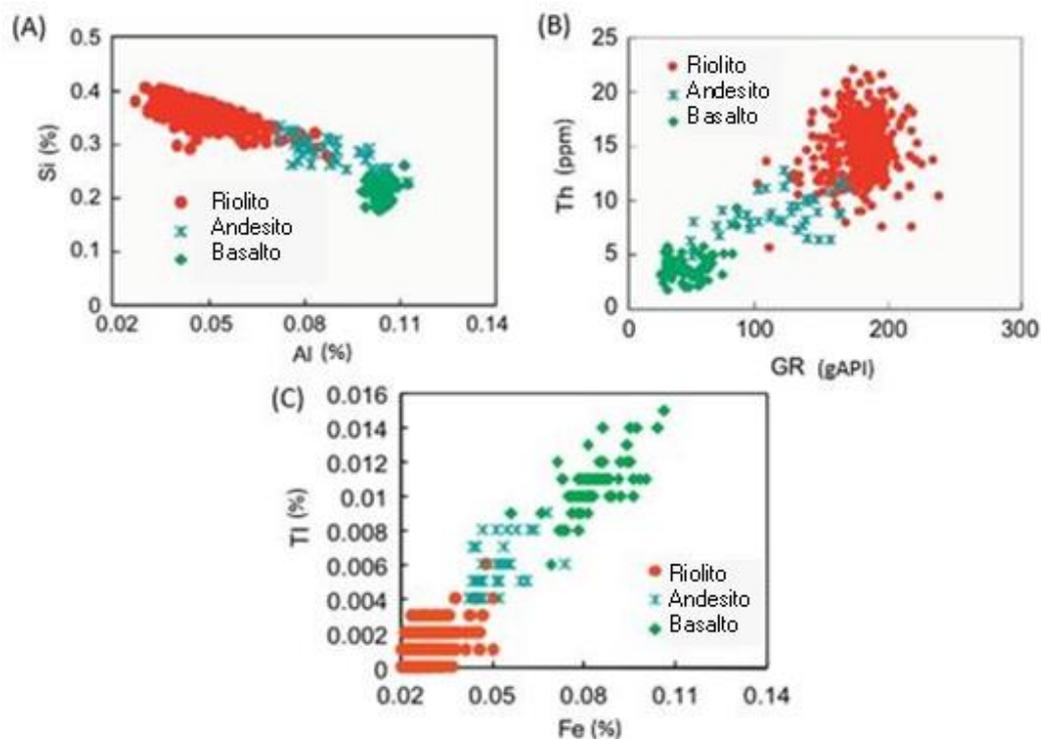
As feições “barriguda” estão associadas a soleiras e são caracterizadas por um aumento na curva de GR no terço superior da intrusão, com valores entre 8 e 82 gAPI (Trosdorf Junior *et al.*, 2014). Os valores elevados de GR são consequência da rápida cristalização nas bordas da intrusão em contraste com o resfriamento mais lento em seu interior, permitindo a percolação e o acúmulo de voláteis nessa porção. Dados litogeoquímicos e de GR espectrais também indicam um enriquecimento de tório e urânio nessa mesma porção das soleiras (Trosdorf Junior *et al.*, 2014).

As feições “caixote” estão associadas a corpos ígneos menos espessos, em que o perfil de GR segue um valor constante, o qual pode ser interpretado como um evento de rápida cristalização, como diques (Trosdorf Junior *et al.*, 2014). Sendo assim, a correta caracterização destes corpos traz informações e dados que possibilitam, por exemplo, a distinção entre soleiras e diques.

As curvas de RHOZ apresentam valores médios elevados para as rochas ígneas intrusivas básicas, da ordem de 2.95 g/cm<sup>3</sup>. Soleiras e lacólitos com zona de diferenciação magmática podem apresentar setores com diferentes densidades de matriz. Valores de densidade abaixo do esperado para rochas ígneas intrusivas

podem estar relacionados à fratura e/ou arrombamento do poço, enquanto valores mais altos que os esperados podem indicar presença de sulfetos, como a pirita (Delpino e Bermúdez, 2009; Trosdorf Junior *et al.*, 2014).

Inúmeras têm sido as propostas para classificação de rochas ígneas. São apresentados alguns métodos gráficos baseados em dados de perfis de poço e geoquímica utilizados para diferenciar e classificar as rochas ígneas, visto que esses dados respondem à composição e textura das rochas. Uma análise cuidadosa desses dados pode revelar muito sobre a origem e as condições (pressão, profundidade, extensão) sob as quais o magma se formou (Gill, 2010; Liu *et al.*, 2012; Ran *et al.*, 2014). Muito embora não abordado neste trabalho, os dados de GR espectral e de litogeoquímica são utilizados nas tentativas de distinguir as rochas ígneas. Os *crossplots* GR X Th, Al x Si, Fe x Ti são utilizados por Ran *et al.*, 2014 para separar magmas ácidos (riolito), intermediários (andesito) e básicos (basalto) (Figura 22). Zou *et al.* (2013) utiliza perfis de poços de GR, RES, DT, RHOZ e NPHI para classificar as rochas ígneas, dado que as básicas apresentam valores mais baixos de GR e DT e valores mais altos de RES, RHOZ e NPHI, quando comparados com rochas ígneas ácidas.



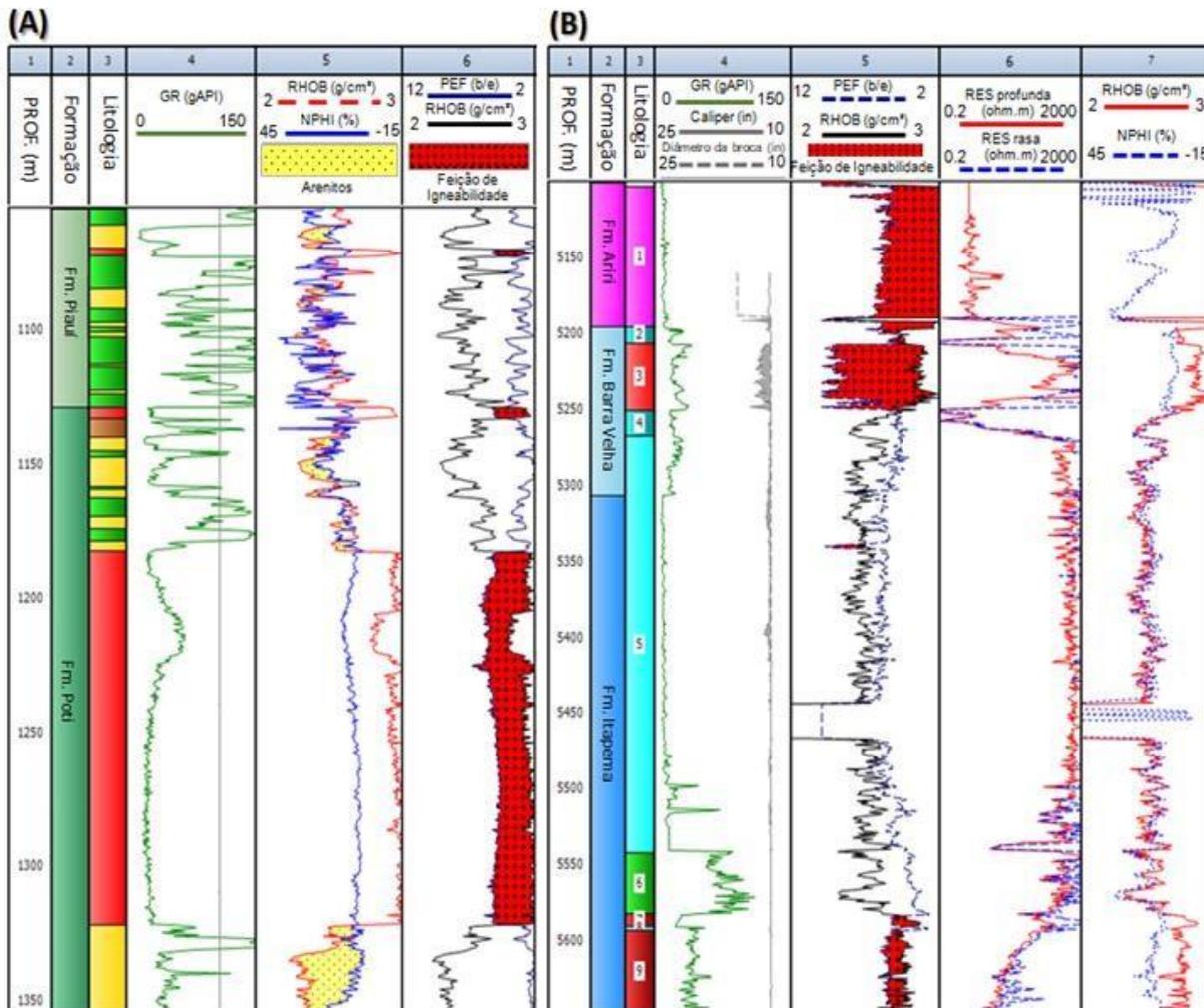
**Figura 22:** *Crossplots* utilizados para classificação das rochas ígneas. (A) Teor de sílica e alumínio, (B) GR e teor de tório, (C) Teor de ferro e titânio. Fonte: Modificado de Ran *et al.*, 2014.

## 5.2. Feição de Igneabilidade

Em alguns poços, os perfis de GR não são suficientes para caracterizar com segurança a presença ou o correto posicionamento de uma rocha ígnea e separá-las das rochas sedimentares. Para mitigar esse problema é utilizada a Feição de Igneabilidade, proposta por De Oliveira *et al.*, 2022, que utiliza os perfis de RHOZ e PEFZ.

No mesmo track são colocados o RHOZ, com valores de 2 a 3 g/cm<sup>3</sup> e o PEFZ de 2 a 12 B/E, na escala invertida. Os trechos onde ocorre o *crossover* são regiões com forte indício de rocha ígnea básica (Figura 23) (De Oliveira *et al.*, 2022). O *crossover* é observado quando os valores de PEFZ e de RHOZ aumentam simultaneamente, devido à diferença na densidade aparente e no número atômico dos elementos que compõem as rochas ígneas básicas e as rochas sedimentares encaixantes (De Oliveira, 2023).

Essa metodologia é aplicada para rochas ígneas básicas porque apresentam mineralogia muito diferente das rochas sedimentares, e conseqüentemente variações mais significativas nos perfis de RHOZ e PEFZ. Além disso, por serem maciças, as ígneas básicas não apresentam grandes variações no perfil de RHOZ, resultando em uma evidente Feição de Igneabilidade, homogênea e com boa separação entre as curvas (De Oliveira, 2023). Já as rochas ígneas ácidas têm uma mineralogia muito semelhante às rochas sedimentares siliciclásticas, tornando difícil a separação de ambas utilizando este método (De Oliveira, 2023).



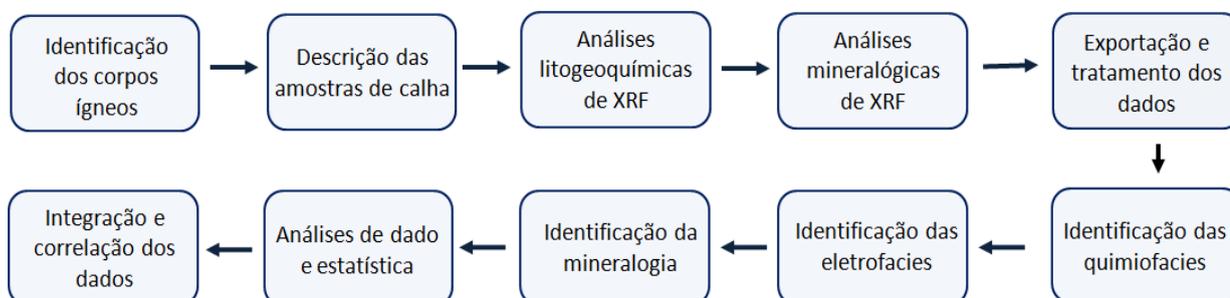
**Figura 23:** Perfis de PEFZ e RHOZ usados para a obtenção da Feição de Igneabilidade, indicada pela hachura vermelha. Fonte: Modificado De Oliveira, 2023.

Para trabalhar com a Feição de Igneabilidade é importante identificar os falsos positivos do método, que ocorrem nas anidritas, nas zonas de arrombamento e nos carbonatos cristalinos. A anidrita apresenta valores de RHOZ e PEFZ iguais às intrusões de diabásio, então a Feição de Igneabilidade se comporta da mesma forma em ambas (De Oliveira *et al.*, 2022). Em zonas de arrombamento, PEFZ aumenta devido à maior concentração de fluido de perfuração rico em baritina (PEFZ = 267 B/E) e RHOZ diminui devido a imprecisões nas leituras, gerando um falso positivo no método (De Oliveira, 2022). Em zonas contendo carbonatos que sofreram metamorfismo de contato, os valores de PEFZ caem com relação aos valores de rochas ígneas, mas os valores de RHOZ permanecem constantes, a ponto da curva de PEFZ ainda permanecer à esquerda, provocando uma falsa Feição de Igneabilidade (De Oliveira *et al.*, 2022).

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para execução deste trabalho se baseia em dados de perfis de poços, amostras de calha e geoquímica para identificar e caracterizar as intrusões, através da relação entre os perfis de poços e a química e mineralogia da rocha. O estudo foi realizado nos intervalos correspondentes à 7 intrusões ígneas em 6 poços exploratórios da Bacia do Parnaíba, onde as amostras de calha foram coletadas em intervalos de 3 em 3 metros. Os dados interpretados e adquiridos são apresentados na Tabela 1 e o processo laboratorial é apresentado no fluxograma da Figura 24.

As amostras de calha utilizadas neste estudo foram doadas ao Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense pela Parnaíba Gás Natural (PGN), atual Eneva S/A, e foram a base para a redescrição detalhada com foco na mineralogia e para as análises de fluorescência e difração de raios-X. Os perfis de poços fazem parte do pacote de dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), constituído por perfil composto, dados de perfuração, relatório final de poço e perfis de poço obtidos por perfilagem a cabo nos formatos dliis e las.



**Figura 24:** Fluxograma sintetizando a metodologia utilizada no presente trabalho.

**Tabela 1:** Relação dos poços usados no trabalho com os intervalos analisados para cada método.

| Poços        | Intervalos com análise de perfis | Intervalos com descrição de calha | Intervalos com análises de XRF | Intervalos com análises de XRD |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1-OGX-93-MA  | 1565-1635 / 1800-1945 m          | 1565-1635 / 1800-1945 m           | 1565-1635 / 1800-1945 m        | -                              |
| 1-OGX-101-MA | 1413-1600 m                      | 1413-1600 m                       | 1413-1600 m                    | 1413-1600 m                    |
| 1-OGX-110-MA | 1182-1320 m                      | -                                 | 1182-1320 m                    | -                              |
| 1-OGX-118-MA | 1343-1482 m                      | -                                 | -                              | -                              |
| 1-OGX-122-MA | 1150-1285 m                      | -                                 | 1150-1285 m                    | -                              |
| 3-PGN-5-MA   | 1164-1332 m                      | -                                 | 1164-1332 m                    | -                              |
| 4-PGN-14-MA  | 1182-1314 m                      | -                                 | -                              | -                              |
| 4-OGX-49-MA  | 1458-1632 m                      | 1458-1632 m                       | 1458-1632 m                    | -                              |

## 6.1 Perfis de poço

A primeira etapa do trabalho consiste na utilização dos perfis de poços para identificação e classificação dos intervalos correspondentes às rochas ígneas de oito poços exploratórios, os quais tínhamos acesso às amostras de calha. Os principais perfis utilizados nessa etapa são: GR, RHOZ e PEFZ.

A análise dos perfis realizada no software Interactive Petrophysics® inclui a geração da Feição de Igneabilidade para separar as zonas com diabásios e utilização do perfil de GR para dividir estes corpos ígneos em feição “caixote” e feição “barriguda”, dando início aos demais processos laboratoriais.

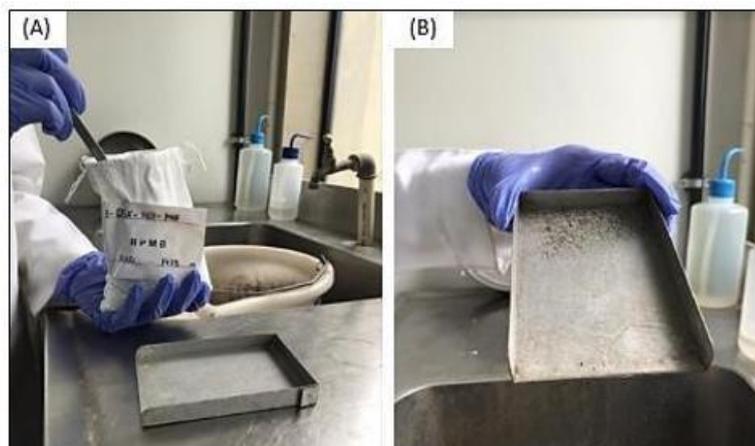
Posteriormente, com os dados de perfis de poços são realizadas análises estatísticas e gerados *crossplots*, que permitiram a separação das intrusões de feição “barriguda” em eletrofácies distintas. O diagrama de Zou *et al.* (2013) foi utilizado para classificar as rochas ígneas de acordo com seus valores de GR e RHOZ.

## 6.2 Descrição de amostras de calha

Para a realização desta etapa, as amostras são lavadas e descritas com foco principalmente nas variações mineralógicas das rochas. São descritas as amostras de calha, nos intervalos das ígneas identificadas por perfil, de três dos oito poços estudados (1-OGX-101-MA, 4-OGX-49-MA e 1-OGX-93-MA; Tabela 1) totalizando 194 amostras, em que cada amostra corresponde a 3m de rocha cortada. As amostras estavam acondicionadas em sacos de pano (Figura 25), dispostos em caixas, devidamente identificados com nome do poço e profundidade de amostragem,

conforme resolução nº 71 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Para a preparação das amostras, uma alíquota de aproximadamente 20g é separada em uma calha de alumínio (Figura 25) onde é feita a lavagem, a fim de retirar o excesso de contaminantes que possam mitigar características importantes da rocha no processo de descrição.



**Figura 25:** (A) Sacos de pano contendo amostras de calha (B) Calha de alumínio com amostras lavadas para a descrição.

Com as amostras lavadas e molhadas, iniciou-se a descrição no Estereomicroscópio Binocular, modelo Stemi 508 (Figura 26), baseada nos parâmetros: cor, composição, textura, granulometria, coesão e mineralogia.



**Figura 26:** Estereoscópio – Stemi 508, utilizado para descrição das amostras de calha.

Essa etapa de descrição permitiu que os resultados finais tivessem contribuição de informações diretamente da formação geológica que, associados aos perfis de poços, ao comportamento químico elementar e à mineralogia de cada amostra foi fundamental para entender as variações ao longo dos corpos ígneos e caracterizar as feições “barriguda” e “caixote”. Os dados das descrições são organizados e plotados no software SedLog, mostrado na Figura 27. As fotografias das amostras de calha apresentadas na seção de resultados e discussões são tiradas pela câmera acoplada ao estereoscópio utilizado nas descrições, com zoom de 8x, 16x, 32x ou 64x, a depender da necessidade de detalhamento.

| 1-OGX-101-MA |           |           |  |  |
|--------------|-----------|-----------|--|--|
| SCALE (m)    | FORMATION | LITHOLOGY | NOTES  | OBS                                      |
| 1413         |           |           | DIA, PRT/BCO, FAN, MAF(30%)FEL(70%), CBN, ANG, MLE, sem aumento no tamanho dos grãos - ARN, HIA/BCO, FNO/MED/GRO, ARD/SAR, R, QTZ/CAO, DSG/CMP, DRO  | Fluido de perfuração                     |
| 1416         |           |           | DIA, PRT/BCO, FAN, MAF(20%)FEL(80%), RAR CBN, ANG, MLE, sem aumento no tamanho dos grãos - ARN, HIA/BCO, MFN/FBO, ARD, B, QTZ, DSG, DRO  | Fluido de perfuração, fragmento de broca |
| 1419         |           |           | DIA, PRT/BCO, FAN, MAF(40%)FEL(60%), CBN, ANG, MLE, sem aumento no tamanho dos grãos, TRC mineral esverdeado (olivina?) - TRC ARN, HIA, MFN/FNO, ARD, DSG, DRO   | Fluido de perfuração, fragmento de broca |
| 1422         |           |           | DIA, PRT/BCO/CNZ, FAN, MAF(40%)FEL(60%), CBN, ANG, MLE, sem aumento no tamanho dos grãos, TRC mineral esverdeado (olivina?) - TRC ARN, HIA, MFN/FNO, SAR, DSG, DRO                                     | Fluido de perfuração                     |
| 1425         |           |           | DIA, PRT/BCO/CNZ, FAN, MAF(30%)FEL(70%), CBN, ANG, MLE, sem aumento no tamanho dos grãos, TRC mineral esverdeado (olivina?), ALT plagioclásio esverdeado   | Fluido de perfuração                     |
| 1428         |           |           | DIA, PRT/BCO/CNZ, FAN, MAF(40%)FEL(60%), CBN, ANG, MLE, pouco aumento no tamanho dos grãos, TRC mineral esverdeado (olivina?) - RAR ARN, HIA, FNO, ANG, DSG, DRO                                       | Fluido de perfuração, plástico           |
| 1431         |           |           | DIA, PRT/BCO/CNZ, FAN, MAF(20%)FEL(70%), CBN, ANG, MLE, pouco aumento no tamanho dos grãos, 10% mineral esverdeado (olivina?), TRC mineral verde amarronzado (clorita?)                                |  |
|              |           |           | DIA, PRT/BCO/CNZ, FAN, MAF(60%)FEL(40%), CBN, ANG, MLE, aumento no tamanho dos grãos, 10% mineral verde amarronzado (clorita?), bolha nas fraturas da rochas - RAR ARN, HIA, FNO/MED, SNG, B, DSG, DRO |  |

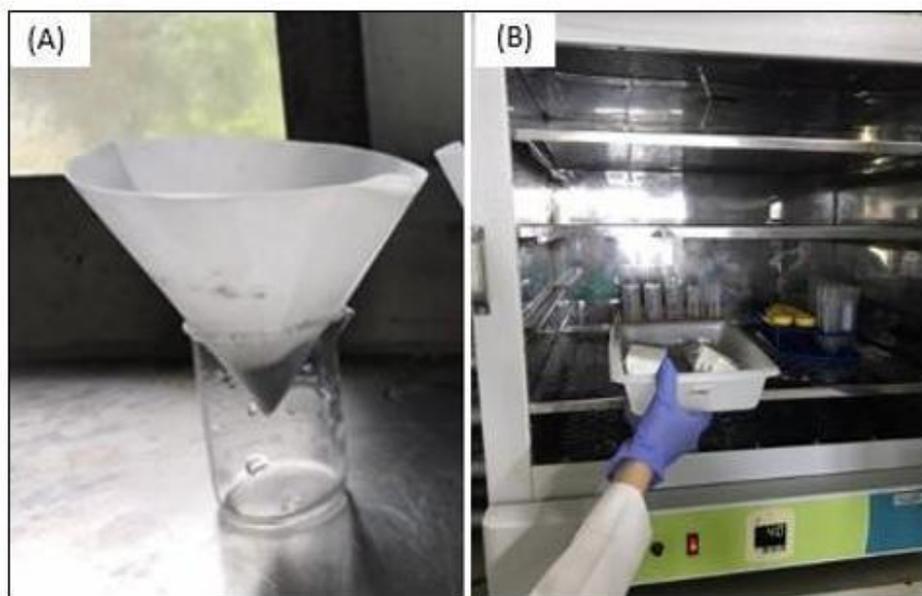
**Figura 27:** Imagem do Software SedLog utilizado para descrição das amostras de calha, correspondente à descrição do poço 1-OGX-101-MA, no intervalo 1413/1434 m.

### 6.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

As análises a partir da fluorescência de raios-X são realizadas em seis dos oito poços estudados (1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 3-PGN-5-MA e 4-OGX-49-MA; Tabela 1), totalizando 298 amostras. Para esse processo, uma porção de aproximadamente 30g de cada amostra passa pelo processo de lavagem com água deionizada, usando uma peneira de 0,065 micrômetros e detergente neutro, a fim de evitar perda de material argiloso e a presença de contaminantes da perfuração que

possam interferir nas análises químicas.

As amostras lavadas são colocadas em filtros de papel poroso e encaminhadas para a estufa à temperatura de 40° C por 24 horas, garantindo que não reste nenhuma umidade (Figura 28). Em seguida, as amostras são armazenadas em sacos *Zip-Lock* em ambiente fechado, para prevenir contaminação e ganho de umidade.



**Figura 28:** (A) Filtro de papel utilizado para o escoamento da água das amostras (B) Estufa utilizada para retirar a umidade das amostras.

O procedimento utilizado no FRX é o método do pó solto, em que o material seco passa por um processo de moagem antes da leitura. As amostras são maceradas utilizando um gral de Ágata, com o objetivo de diminuir o tamanho dos grãos e tornar a amostra mais uniforme e homogênea, aprimorando a precisão e qualidade dos dados (Figura 29). Como a energia incide superficialmente na amostra, se as partículas forem grandes, podem existir elementos presentes em menor quantidade que não sejam detectados (Krug & Rocha, 2019).



**Figura 29:** Gral de Ágata utilizado para macerar as amostras.

Após a moagem, cerca de 10g do material é colocado de maneira uniforme no porta amostras, com diâmetro interno de 30 mm, selado com filme de polipropileno (Figura 30). As amostras são levemente comprimidas para evitar que as partículas se soltem durante a análise, e então são encaminhadas para o equipamento de fluorescência de raios-X EPSILON 1 da Malvern Panalytical (Figura 31), que utiliza a dispersão de energia para determinar a composição química de cada intervalo analisado.



**Figura 30:** Capsulas de plástico utilizados para as análises químicas de FRX. A base do recipiente é o contato entre a amostra e o leitor do equipamento.



**Figura 31:** Equipamento de fluorescência de Raios-X EPSILON 1 da Malvern Panalytical utilizado para leitura química elementar das amostras de calha.

Foram efetuadas leituras em uma atmosfera de ar obtendo os elementos químicos desde o magnésio (Mg), de número atômico igual a 12, até o urânio (U), de número atômico igual a 92, representados por porcentagem de peso no caso de elementos representativos maiores e menores, ou ppm no caso de elementos traço.

Ainda, faz uso de uma ampola de raios-X com ânodo de Ag (prata) e janela fina e um gerador de 50 Kv para a excitação dos elementos.

As análises são realizadas obtendo os seguintes elementos maiores e menores em percentual (%): Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti e Fe; e os elementos traço em partes por milhão (ppm): Cr, Co, Ni, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Ba, Th e U. As amostras são irradiadas durante 10 minutos, com o aparelho configurado para leituras a partir do método pó solto no modo Omnian.

#### **6.4 Difração de Raios-X (DRX)**

As análises de DRX foram feitas em 10 amostras do poço 1-OGX-101-MA na intrusão de feição “barriguda”, detalhando a variação mineralógica da rocha. Foram escolhidas amostras representativas de intervalos do topo, da base e da porção central da soleira. As intrusões de feição “caixote” não foram analisadas no DRX visto

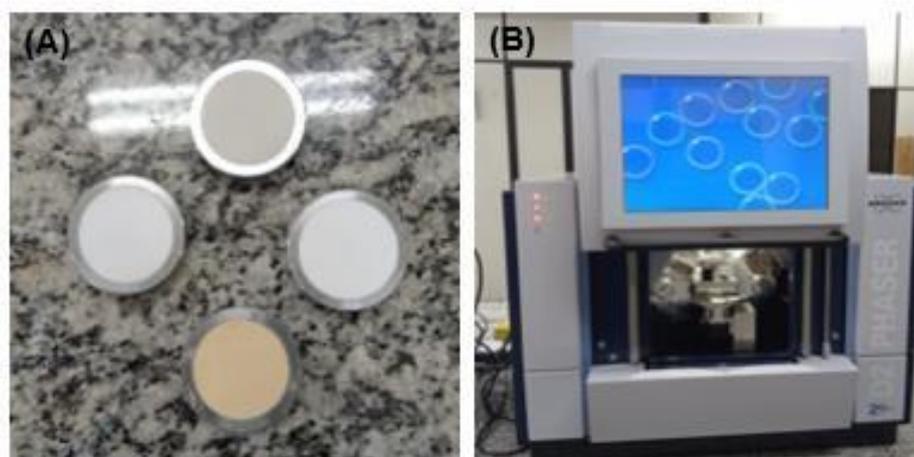
que os dados de descrição e de FRX sugerem que essa feição não é resultado variações internas.

As amostras utilizadas na difração de raios-X passam pelo mesmo processo de lavagem e secagem descrito no item 6.3. Neste caso, as amostras lavadas passam por um processo de moagem mecânica utilizando um moinho de bolas do tipo planetário, modelo S1 da Retsch (Figura 32).



**Figura 32:** Moinho de bolas de carbeto de tungstênio do tipo planetário, modelo S1 da Retsch, usado para moer as amostras para a difração de raios-X.

Para obtenção da condição granulométrica ideal e de homogeneidade, as amostras são moídas a 80 rpm em um recipiente com oito esferas de carbeto de tungstênio (WC) por 8 minutos, com o equipamento operado no modo cíclico. Após a moagem, cerca de 5g do material é colocado de maneira uniforme no porta amostras de ~50 mm de diâmetro no formato *backloading*, para evitar a orientação preferencial. As amostras são encaminhadas para análise geoquímica no equipamento D2 Phaser da Bruker, um difratômetro de pó de bancada que opera na geometria Bragg-Bretano, localizado no laboratório do Departamento de Geoquímica da Universidade Federal Fluminense (UFF) (Figura 33).



**Figura 33:** (A) Material preparado para leitura, no porta amostra no formado backloading. (B) Equipamento D2 Phaser utilizado para as análises de DRX.

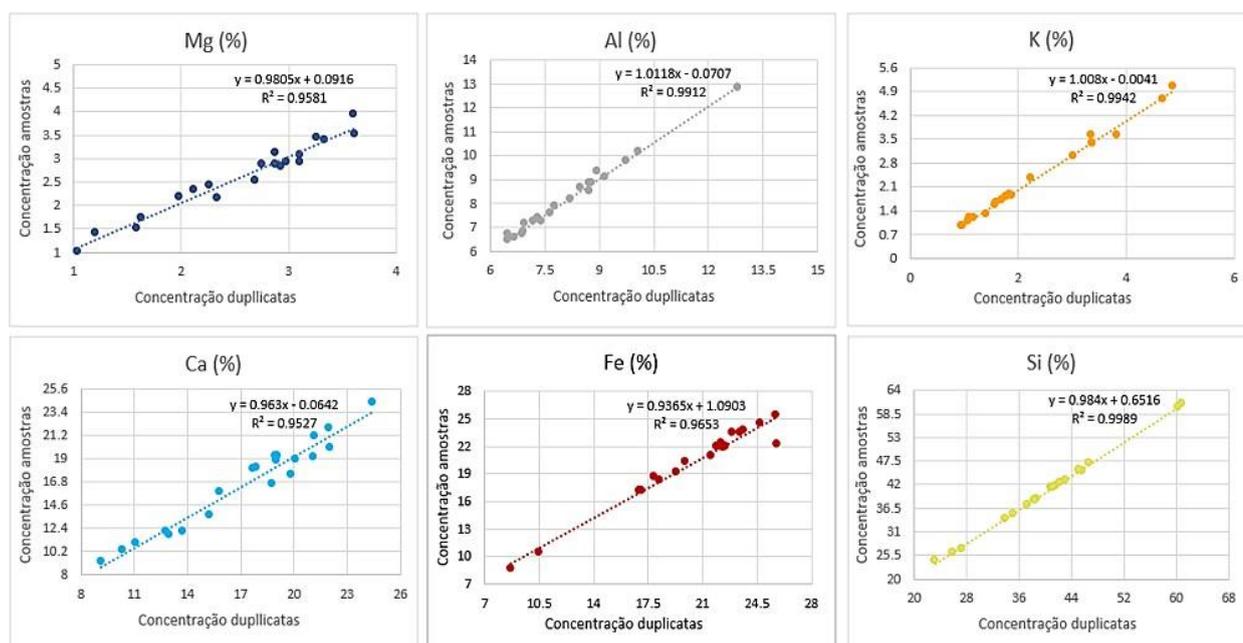
Esse equipamento possui alinhamento goniométrico automático, com precisão de  $\pm 0.02^\circ$  em toda a faixa angular e variação de  $-3^\circ$  a  $160^\circ$  em  $2\theta$ , com velocidade de rotação definida pelo usuário. Sua fonte de raios-X é um tubo com ânodo de cobre com linha de emissão característica de  $1,54 \text{ \AA}$  (Cu- $K\alpha_1$ ) e potência máxima de 300W (30 kV x 10 mA). As análises deste trabalho são realizadas com ângulo de varredura do equipamento de  $3^\circ$  a  $100^\circ$ , passo de  $0,02^\circ$  com tempo de contagem de 3 segundos a cada passo.

## 6.5 Controle de qualidade dos dados

Durante o processo de aquisição dos dados de FRX, são realizados dois métodos de controle de qualidade: análises diárias de amostra contendo calcita pura, para avaliar a calibração do equipamento, e análises de duplicatas sob as mesmas condições de leitura, a cada 10 amostras, a fim de controlar estatisticamente o processo e saber se os desvios ocorrem dentro dos limites aceitáveis, representados por até 10% de erro. Além disso, a cada 24 horas é feita a verificação do modelo de calibração interna do equipamento (ganho), que é uma correção de deriva para manter a estabilidade instrumental.

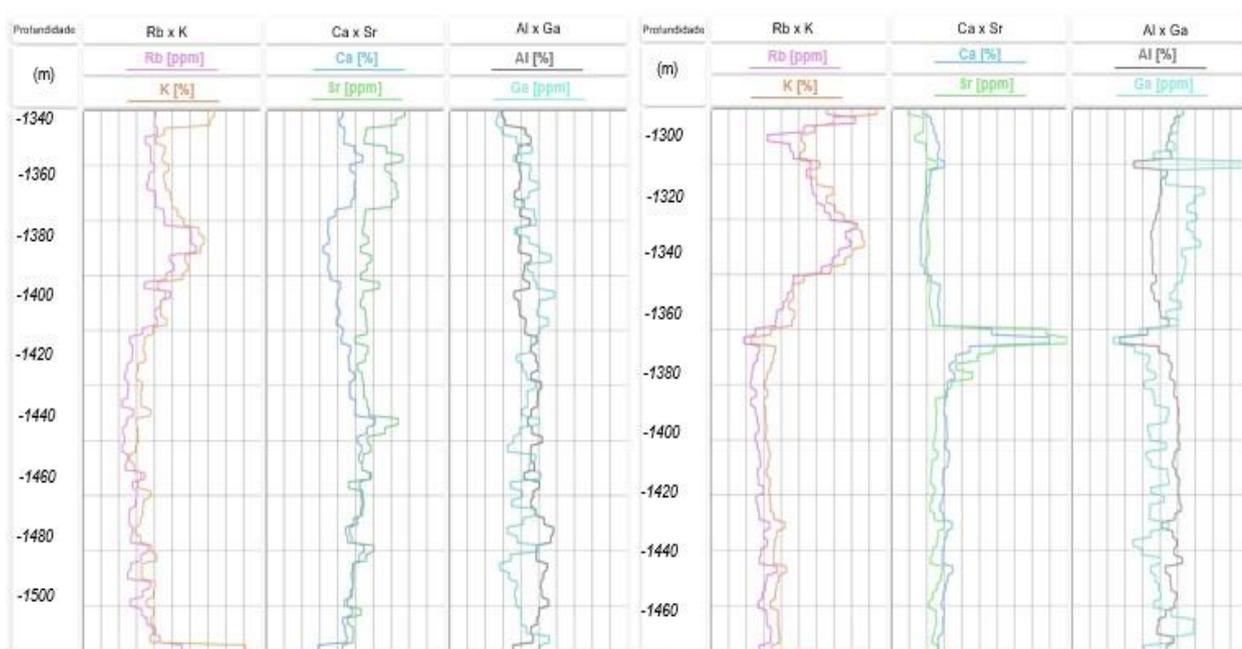
O controle de qualidade dos dados é uma etapa crucial na aquisição e interpretação dos dados obtidos por meio do FRX, uma vez que se trata de um método analítico extremamente sensível. Para garantir a confiabilidade dos dados, este trabalho utiliza análises de duplicatas e comparações entre elementos maiores e menores, cujos resultados são apresentados a seguir.

Os resultados das duplicatas são apresentados na forma de gráficos de dispersão dos elementos químicos maiores (em %) identificados nas leituras de FRX (Figura 34). Esses gráficos são criados a partir da relação entre os dados analisados na primeira corrida com os dados analisados em uma segunda corrida (duplicatas), com o intuito de analisar se os dados são confiáveis. De forma geral, os resultados são satisfatórios, visto que a análise dos gráficos mostra que os dados se ajustam à linha de tendência e o coeficiente de determinação ( $R^2$  no gráfico) varia de 0.95 a 0.99, indicando uma precisão dos dados entre 95 a 99%. Esses dados validam a confiabilidade e a acurácia das análises realizadas.



**Figura 34:** Gráficos de dispersão que correlacionam as concentrações das amostras com as concentrações das duplicatas dos elementos maiores (em %) obtido pelo FRX, com dados dos seis poços analisados.

Outro controle de qualidade se baseia na metodologia De Oliveira *et al.*, (2022), que relaciona elementos traços com elementos maiores, como Ca x Sr, K x Rb e Al x Ga. O Sr, Rb e Ga se restringem a substituírem atômicamente o Ca, K e Al, respectivamente, devido as suas similaridades de raio atômico e NOX. Assim, o aumento de Ca, K e Al tem que estar respectivamente relacionado ao aumento de Sr, Rb e Ga. Essa relação é apresentada na Figura 35, obtida através do Software Appy, desenvolvido no Giecar (Universidade Federal Fluminense), onde foram utilizados os dados da feição barriguda dos poços 1-OGX-101-MA e 4-OGX-49-MA.

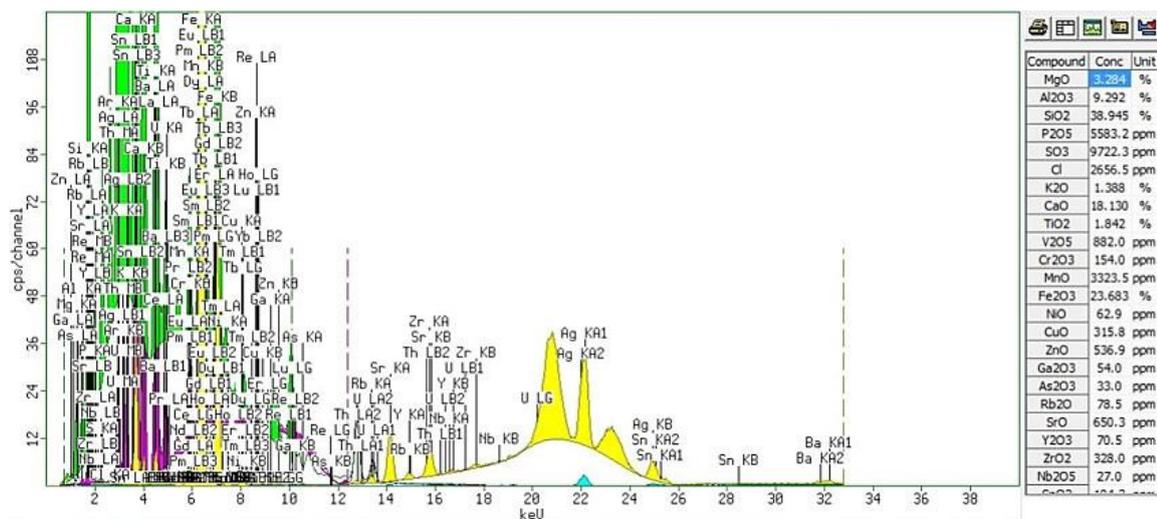


**Figura 35:** Plot relacionando elementos maiores e elementos traço, segundo a metodologia De Oliveira *et al.* (2022), na feição “barriguda” dos poços 1-OGX-101-MA e 4-OGX-49-MA, respectivamente.

Para os dados de DRX, o controle de qualidade é a comparação com os resultados de FRX obtidos anteriormente nas mesmas amostras.

## 6.6 Tratamento e integração dos dados

O tratamento dos dados de FRX, ao final de cada leitura é feita a análise do espectro obtido, com o objetivo de correlacionar as áreas dos picos com a concentração dos elementos correspondentes, identificando possíveis elementos presentes nas amostras que não foram detectados pelo equipamento. Após esse processo, o espectro é traduzido pelo software do equipamento em uma tabela com os elementos químicos identificados e suas concentrações, ilustrada na Figura 36, correspondente à profundidade de 1623 m do poço 4-OGX-49-MA.



**Figura 36:** Espectro lido e tabela de elementos químicos identificados na amostra de calha do poço 4OGX-49-MA na profundidade de 1623 m gerados pelo software do equipamento de FRX utilizado.

Esses resultados são exportados pelo software do equipamento na forma de óxidos, como peso percentual em % ou ppm. Os resultados obtidos são convertidos de óxido para elemento químico, com o objetivo de facilitar a visualização e a interpretação dos dados. A concentração elementar é obtida multiplicando a concentração do óxido por um fator de conversão (FC), calculado pela regra de três que relaciona a massa atômica dos elementos com a quantidade de átomos presentes no óxido, segundo a Equação 3:

$$FC \text{ para } A_xO_y = \frac{x * \text{peso atômico de } A}{(x * \text{massa atômica de } A) + (y * \text{massa atômica de } O)} \quad (\text{Equação 3})$$

O processamento dos difratogramas gerados pela difração de raios-X, a identificação e quantificação mineral é feita no software Diffrac EVA®, da Bruker a partir do método RIR (Reference Intensity Ratio). A caracterização da amostra é feita por meio da comparação entre seu difratograma e padrões de referência disponíveis no banco de dados de minerais do ICDD (International Centre for Diffraction Data), contido no software.

Nesse procedimento, o pico principal de cada mineral é comparado com os picos do difratograma (em d ou em  $2\theta$ ) e a coincidência ou quase coincidência de valores leva à identificação mineral (Kahn, 2000). O método de RIR consiste na utilização das intensidades relativas de uma determinada fase mineralógica em relação a uma outra fase padrão, quando tais métodos são difratados nas suas formas puras (Soares *et al.*, 2014).

Por último, as profundidades são colocadas em cota para que seja possível a correlação entre as soleiras de diabásio de diferentes poços, tanto com base nos perfis de poço como nos dados de FRX. A fórmula para essa conversão é apresentada a seguir:

$$\text{Profundidade em Cota} = \text{MR} - \text{Profundidade Medida} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde MR é o valor da Mesa Rotativa, obtido no Perfil Composto de cada poço.

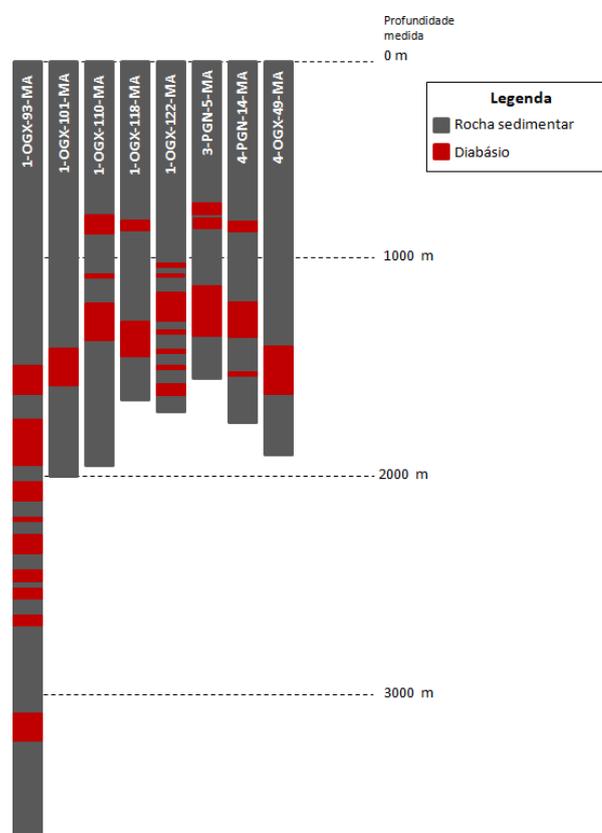
Para a apresentação dos resultados, os dados das descrições das amostras de calha são organizados em tabelas, junto com as fotos tiradas pela câmera do estereoscópio. No software IP são confeccionados os *crossplots* para apresentação das eletrofacies interpretadas, além da correlação de poços. As curvas dos elementos químicos geradas pelas análises de FRX, blocadas de 3 em 3 metros devido à representatividade das amostras, são plotadas e integradas aos perfis de poços usando o software Appy, desenvolvido pelo Giecar (Departamento de Geociências da Universidade Federal Fluminense), onde é realizada a interpretação das quimiofacies.

## 7 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através das interpretações dos perfis de poços, descrição das amostras de calha e análises geoquímicas de fluorescência de difração de raios-X. Serão apresentados gráficos com análises estatísticas, correlação entre poços, descrições completas, fotos dos minerais identificados nas amostras de calha, comportamento químico e mineralógico ao longo das soleiras de diabásio e diferenças observadas entre os diques e soleiras.

### 7.1. Perfis de poço

Foram identificados todos os corpos ígneos intrusivos, dentre diques e soleiras, pertencentes aos oito poços em que tínhamos acesso às amostras decalha, sendo estes: 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-118-MA, 1-OGX-122-MA, 3-PGN-5-MA, 4-OGX-49-MA e 4-PGN-14-MA (Figura 37). Para a identificação e classificação das rochas ígneas dentro das sequências sedimentares, foram utilizados os perfis de GR, RHOZ e PEFZ, por serem perfis de poços da suíte básica que respondem bem à composição e textura da rocha.



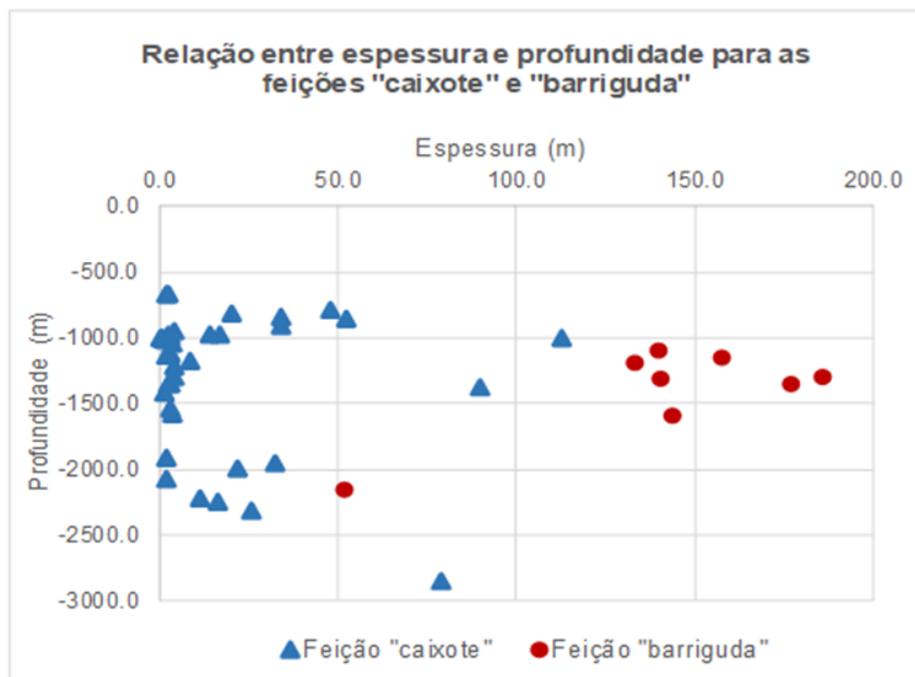
**Figura 37:** Perfis esquemáticos dos poços estudados com a localização das rochas ígneas identificadas a partir dos dados de perfis de poços.

As intrusões de diabásio foram identificadas a partir da Feição de Igneabilidade proposta por De Oliveira *et al.*, (2022), sendo definidas 40 intrusões com espessuras entre 0,3 metros e 185,3 metros (Tabela 2). Depois, esses corpos foram separados em 8 corpos com feição “barriguda” e 32 com feição “caixote”, conforme a metodologia de Trosdtorf Junior. *et al.*, (2014). As intrusões apresentam como formação rochosa encaixante, em sua maioria, as Formações Pimenteiras e Poti, principais rochas geradora e reservatório, respectivamente, das acumulações de gás da Bacia do Parnaíba (Araújo, 2015; Miranda *et al.*, 2018).

Os dados indicam uma relação consistente entre a espessura das intrusões e as feições classificadas a partir do perfil de GR, sendo a feição “caixote” associada a corpos menos espessos e a feição “barriguda” a corpos mais espessos. Além disso, as intrusões mais profundas estão associadas, na maioria das vezes, à feição “barriguda”, enquanto as menos profundas correspondem à feição “caixote” (Figura 38).

**Tabela 2:** Resumo das características dos corpos ígneos identificados em oito poços pertencentes à área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. Foram definidas 40 intrusões, de 0.3 a 185,3 m de espessura, sendo 8 com feição “caixote” e 32 “barriguda”.

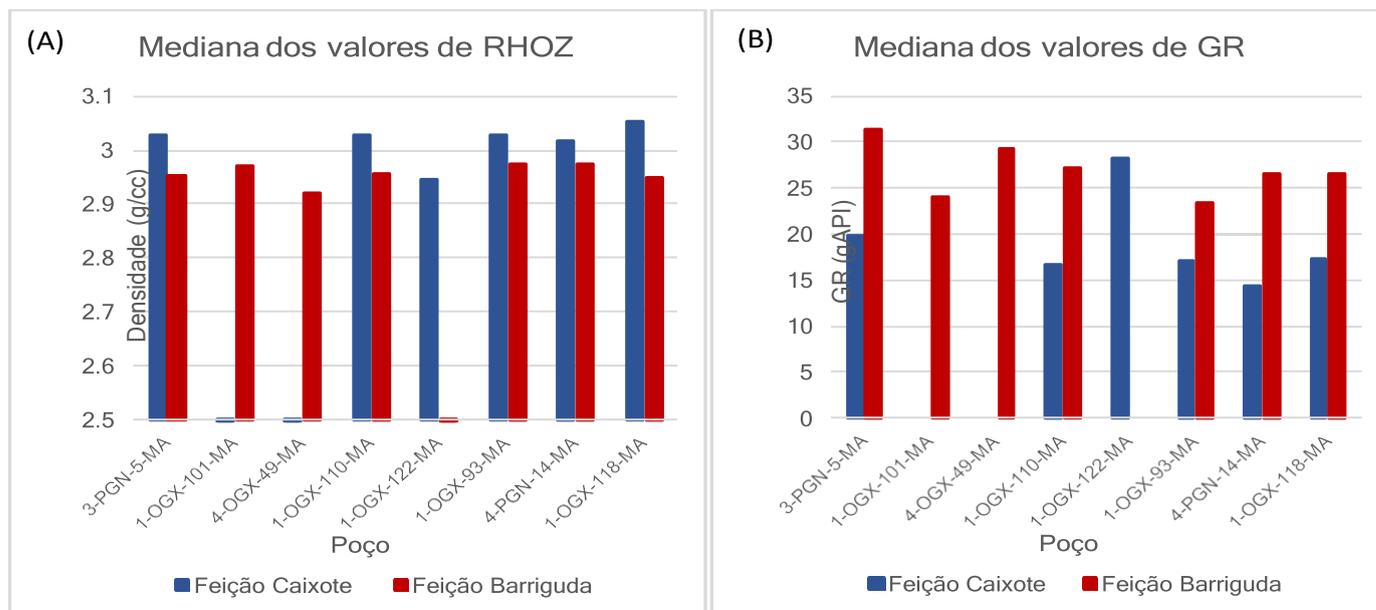
| Poço         | Topo    | Base    | Espessura | Formação encaixante | Feição de GR (metodologia de Trosdorf Junior <i>et al.</i> , 2014) |
|--------------|---------|---------|-----------|---------------------|--|
| 1-OGX-93-MA  | -1352.0 | -1354.7 | 2.7       | Fm. Longá           | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -1588.0 | -1731.4 | 143.4     | Fm. Pimenteiras     | Barriguda  |
| 1-OGX-93-MA  | -1910.2 | -1911.9 | 1.7       | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -1945.3 | -1977.6 | 32.3      | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -1991.7 | -2013.5 | 21.8      | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -2067.0 | -2068.6 | 1.5       | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -2142.6 | -2194.0 | 51.4      | Fm. Pimenteiras     | Barriguda  |
| 1-OGX-93-MA  | -2222.2 | -2233.1 | 11.0      | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -2242.4 | -2258.9 | 16.5      | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -2308.6 | -2334.3 | 25.8      | Fm. Pimenteiras     | Caixote  |
| 1-OGX-93-MA  | -2842.3 | -2921.1 | 78.8      | Fm. Ipu             | Caixote  |
| 1-OGX-101-MA | -1291.4 | -1476.8 | 185.3     | Fm. Longá           | Barriguda  |
| 1-OGX-110-MA | -666.3  | -668.7  | 2.4       | Fm. Pedra de Fogo   | Caixote  |
| 1-OGX-110-MA | -671.1  | -673.1  | 2.0       | Fm. Pedra de Fogo   | Caixote  |
| 1-OGX-110-MA | -787.0  | -834.8  | 47.8      | Fm. Pedra de Fogo   | Caixote  |
| 1-OGX-110-MA | -976.2  | -978.7  | 2.4       | Fm. Piauí           | Caixote  |
| 1-OGX-110-MA | -1035.8 | -1039.5 | 3.7       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-110-MA | -1089.3 | -1228.5 | 139.1     | Fm. Potí            | Barriguda  |
| 1-OGX-118-MA | -842.2  | -876.2  | 34.0      | Fm. Pedra de Fogo   | Caixote  |
| 1-OGX-118-MA | -1305.7 | -1445.7 | 140.0     | Fm. Potí            | Barriguda  |
| 1-OGX-122-MA | -939.7  | -943.9  | 4.2       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -978.2  | -991.9  | 13.7      | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -989.2  | -991.9  | 2.7       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -993.1  | -994.7  | 1.6       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -997.6  | -998.2  | 0.6       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -999.4  | -999.7  | 0.3       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -1001.2 | -1113.5 | 112.3     | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -1131.8 | -1133.5 | 1.7       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -1169.8 | -1178.0 | 8.2       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -1217.5 | -1221.3 | 3.8       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -1293.7 | -1297.5 | 3.8       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 1-OGX-122-MA | -1409.0 | -1410.1 | 1.1       | Fm. Longá           | Caixote  |
| 3-PGN-5-MA   | -780.7  | -806.6  | 25.9      | Fm. Pedra de Fogo   | Caixote  |
| 3-PGN-5-MA   | -816.6  | -836.4  | 19.8      | Fm. Pedra de Fogo   | Caixote  |
| 3-PGN-5-MA   | -1125.5 | -1128.6 | 3.0       | Fm. Potí            | Caixote  |
| 3-PGN-5-MA   | -1135.6 | -1292.7 | 157.1     | Fm. Potí            | Barriguda  |
| 4-OGX-49-MA  | -1343.7 | -1520.3 | 176.6     | Fm. Potí            | Barriguda  |
| 4-PGN-14-MA  | 1011.3  | 1012.6  | 1.2       | Fm. Piauí           | Caixote  |
| 4-PGN-14-MA  | 1181.6  | 1314.3  | 132.7     | Fm. Potí            | Barriguda  |
| 4-PGN-14-MA  | 1569.1  | 1572.3  | 3.2       | Fm. Potí            | Caixote  |



**Figura 38:** Gráfico que relaciona a espessura e profundidade de ocorrência dos corpos ígneos com as feições "caixote" e "barriguda" observadas no perfil de GR, como proposto por Trosdtorf Junior et al. (2014). Os valores de profundidade são apresentados em cota e calculados conforme a Equação 4.

As análises estatísticas a partir dos perfis de GR, RHOZ e PEFZ são apresentados nas tabelas do Anexo A. A análise dos oito poços mostrou que as intrusões correspondentes à feição "caixote" apresentam valores constantes de GR e RHOZ, sugerindo que se trata de uma intrusão sem variação mineralógica entre o topo e a base. Essa feição é marcada por baixos valores de GR, entre o mínimo de 10 gAPI e o máximo de 46 gAPI, com valores de mediana em torno de 20 gAPI. Os corpos com feição "barriguda" apresentam valores de GR um pouco mais elevados, entre 14 e 86 gAPI e mediana em torno de 32 gAPI. Os valores médios de densidade são altos, variando de 2.92 a 3.05 g/cm<sup>3</sup>. As feições "caixote" apresentam densidade média relativamente mais elevada, quando comparada com as feições "barriguda".

Quando comparamos os histogramas de GR e RHOZ dos oito poços é possível identificar dois conjuntos, as intrusões de feição "barriguda" apresentam valores de GR elevados e RHOZ baixos e as intrusões de feição "caixote" apresentam GR mais baixo e RHOZ mais elevado (Figura 39).

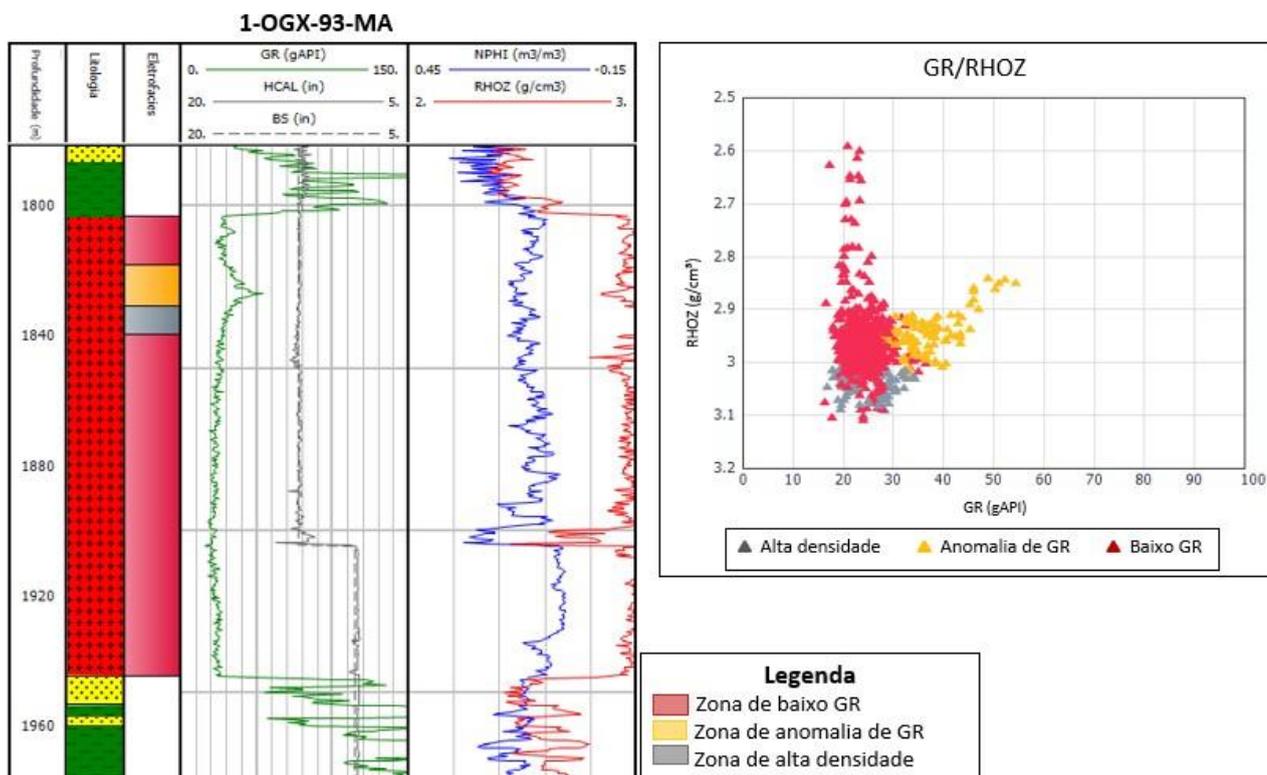


**Figura 39:** Gráficos de histograma comparando os valores de GR e RHOZ das feições "caixote" e "barriguda".

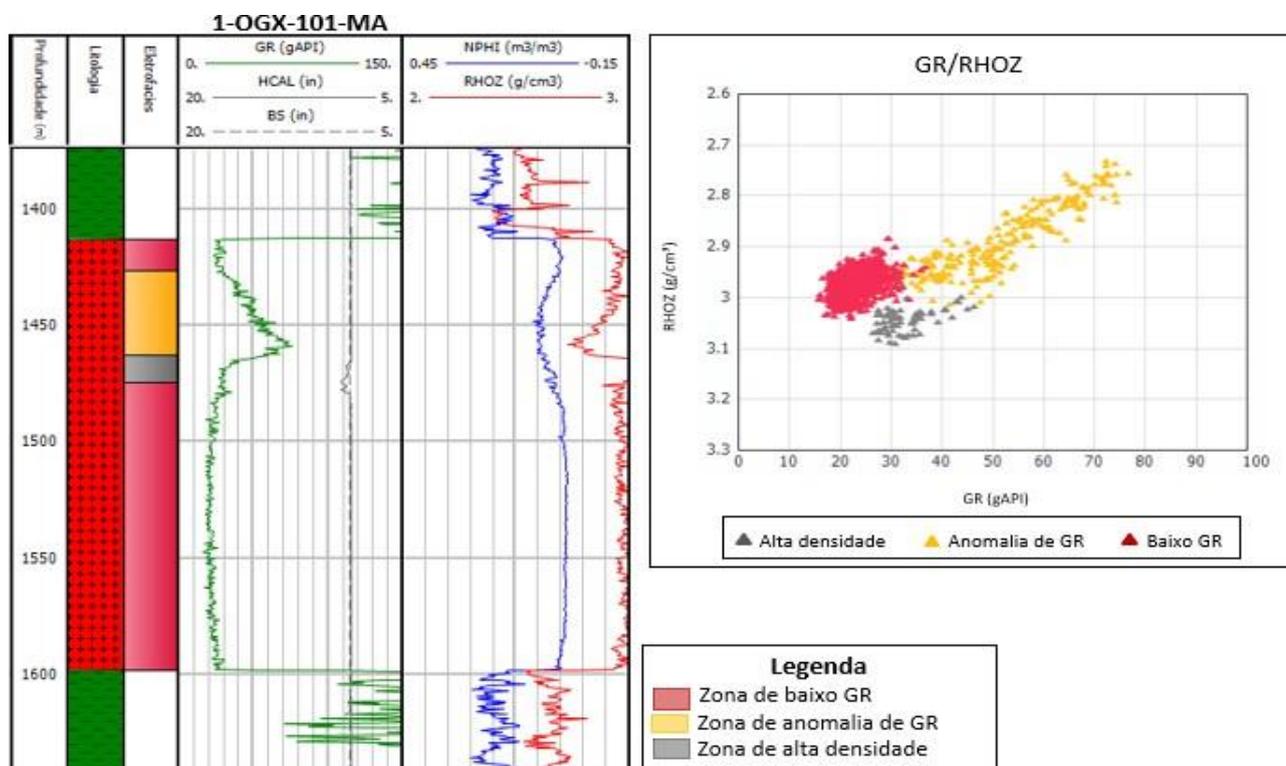
A interpretação dos perfis de poços permitiu a caracterização das soleiras com base em algumas das suas propriedades físicas, como radioatividade e densidade. Utilizando os perfis de GR e RHOZ, as soleiras de feição "barriguda" foram divididas em três eletrofacies com as seguintes características físicas:

1. Zona de baixo GR: valores de GR de aproximadamente 15 a 30 gAPI e valores de RHOZ entre 2,85 e 3,05 g/cm<sup>3</sup>;
2. Zona de anomalia de GR: valores mais elevados de GR, de 30 a 85 gAPI e valores de RHOZ entre 2,73 e 2,85;
3. Zona de alta densidade: valores de GR de 20 a 30 gAPI e altos valores de RHOZ, em torno de 2,97 a 3,11 g/cm<sup>3</sup>.

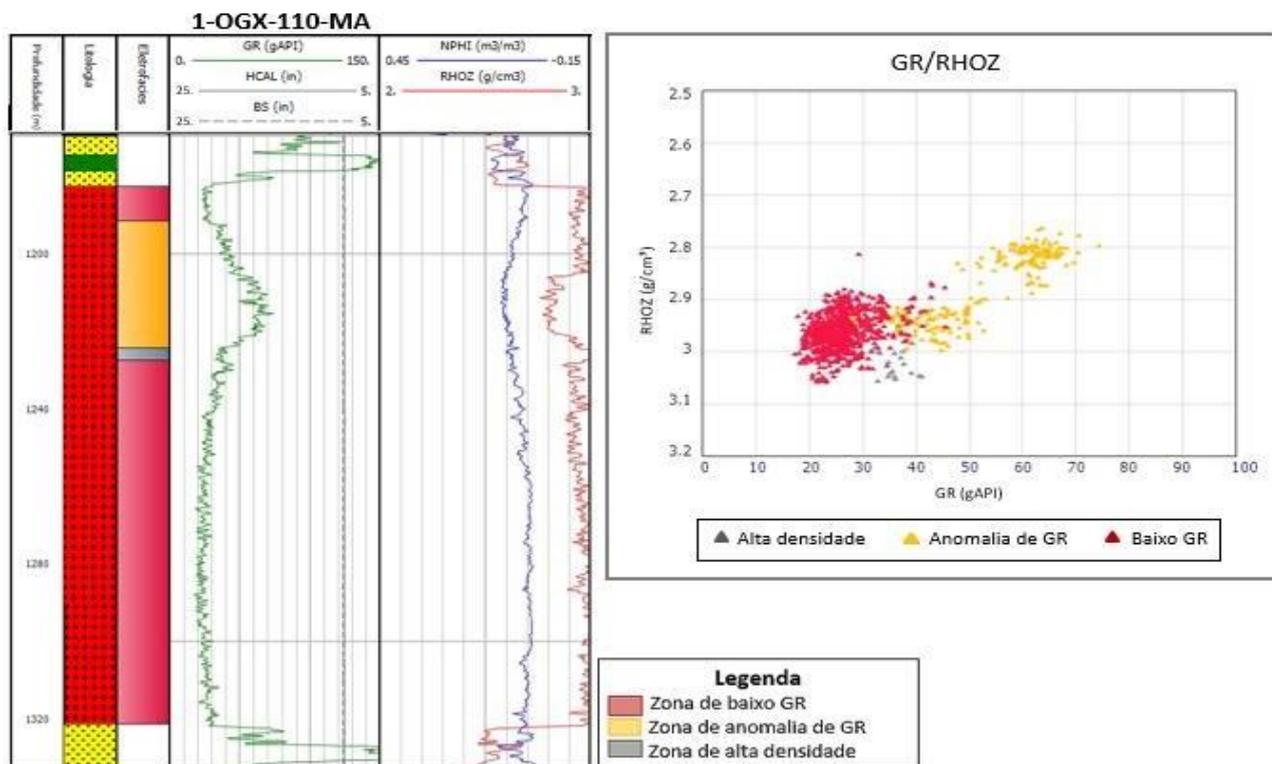
As eletrofacies são apresentadas nos *crossplots* de GR x RHOZ dos poços 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 3-PGN-5-MA e 4-OGX-49-MA (Figuras 40, 41, 42, 43 e 44). O padrão dos *crossplots* e dos perfis evidenciam a semelhança interna entre as feições "barriguda", sugerindo que as eletrofacies sejam correlacionáveis entre si para os cinco poços. Valores pontuais defasados de RHOZ, abaixo de 2,5 g/cm<sup>3</sup>, como vistos em trechos dos intervalos 1900/1910 m do poço 1-OGX-93-MA e 1460/1546 m do poço 4-OGX-49-MA, estão associados a zonas de fraturas, arrombamento ou mudança de fase, confirmadas pelo perfil caliper, conforme proposto por Jerram *et al.* (2019) e De Oliveira *et al.*, (2022).



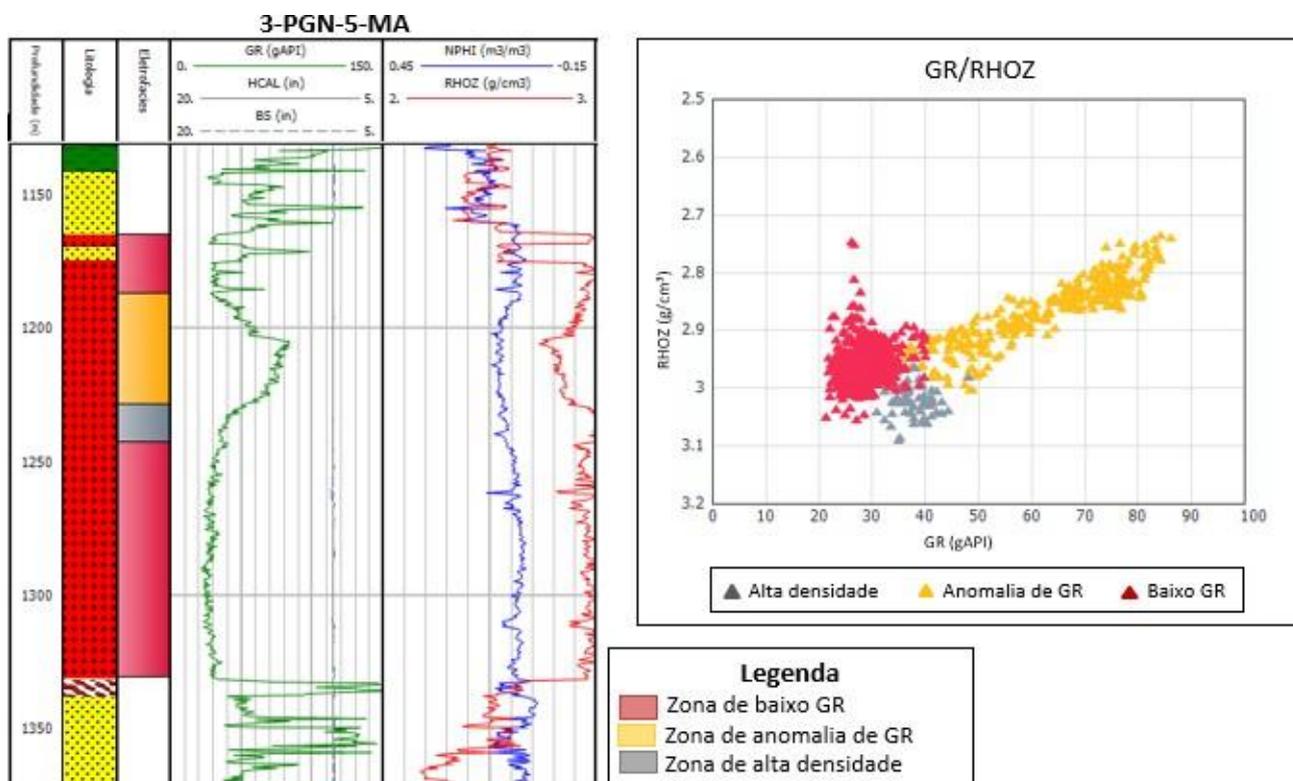
**Figura 40:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 1-OGX-93-MA em três eletrofácies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®.



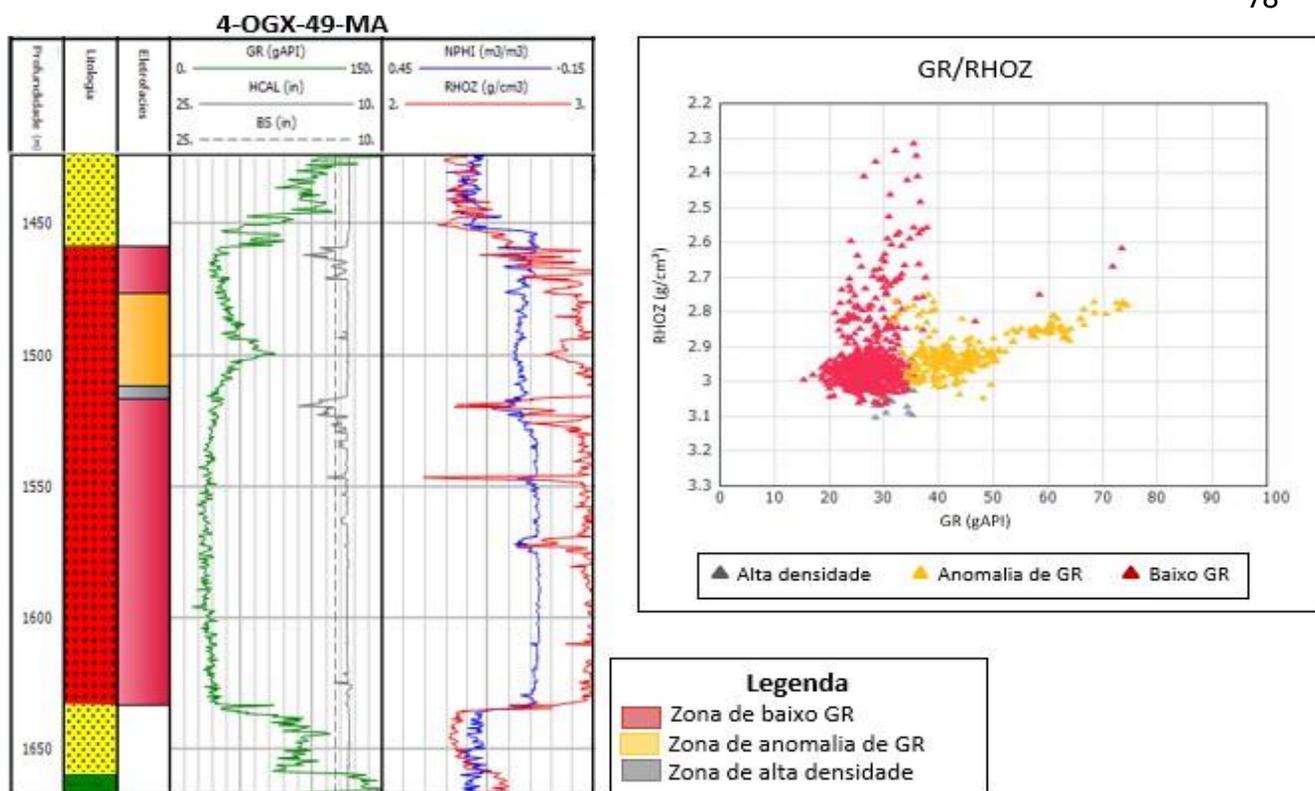
**Figura 41:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 1-OGX-101-MA em três eletrofácies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®.



**Figura 42:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 1-OGX-101-MA em três eletrofácies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®.



**Figura 43:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 3-PGN-5-MA em três eletrofácies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®.



**Figura 44:** Perfis de GR, HCAL, BS, NPHI, RHOZ e o Crossplot de GR x RHOZ separando a soleiras de feição "barriguda" do poço 4-OGX-49-MA em três eletrofacies com propriedades físicas distintas. Os perfis e o crossplot foram plotados no software Interactive Petrophysics®.

## 7.2. Descrição de amostras de calha

As amostras de calha referente às intrusões dos poços 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA e 4-OGX-49-MA são descritas, com o objetivo de identificar as características texturais e a predominância mineralógica de cada intervalo. Essa etapa possibilita o detalhamento das intrusões, sugerindo a subdivisão das feições "barriguda" em três zonas e das feições "caixote" em um único corpo homogêneo. As descrições completas das amostras de calha analisadas neste trabalho são apresentadas nas tabelas do Anexo B.

As feições "barriguda", com base na textura e mineralogia das rochas, são subdivididas em três intervalos específicos: zona do topo, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e com presença pontual de cristais de olivina; zona dos óxidos, com características semelhantes e presença adicional de óxidos, onde os valores de RHOZ diminuem; zona das olivinas, com abundância desse mineral. Todas as intrusões de feição "barriguda" analisadas apresentam as mesmas variações mineralógicas entre o topo e a base da soleira, indicando que suas subdivisões são correlacionáveis entre si.

Ao longo de toda a soleira são identificados cristais caracterizados por grãos subédricos e brilho vítreo, separados em máficos (coloração escura) e félsicos (claros), interpretados como piroxênio/anfibólio e plagioclásio, respectivamente. Esses minerais e suas varrições constituem a mineralogia básica dos diabásios/basaltos. Na zona do topo, além da mineralogia básica do diabásio, são encontrados cristais tabulares pontuais, que, quando não quebrados, apresentam cristalinidade subédrica e coloração esverdeada, algumas vezes desagregados e outras acoplados aos fragmentos máficos, interpretados como olivina. Os fragmentos de coloração hialina identificados em muitas calhas descritas como 100% de diabásio, são interpretados como plagioclásio, visto que é possível identificar características típicas desse mineral, como cristais tabulares e clivagem.

Na porção da anomalia de GR não são constatadas grandes variações mineralógicas, sendo observados fragmentos com as mesmas características do topo da soleira. Por isso, com base nas variações texturais e mineralógicas observadas em calha, essa porção da soleira é classificada na mesma zona do topo.

Na zona dos óxidos, onde ocorre aumento da densidade, são encontrados diversos óxidos, em sua maioria pequenos, da ordem de 100-200  $\mu\text{m}$ . Esses fragmentos são magnéticos, apresentam brilho vítreo e forma predominantemente cristalina, com raros cristais euédricos, octaédricos, interpretados como magnetita (Figuras 45, 46 e 47).

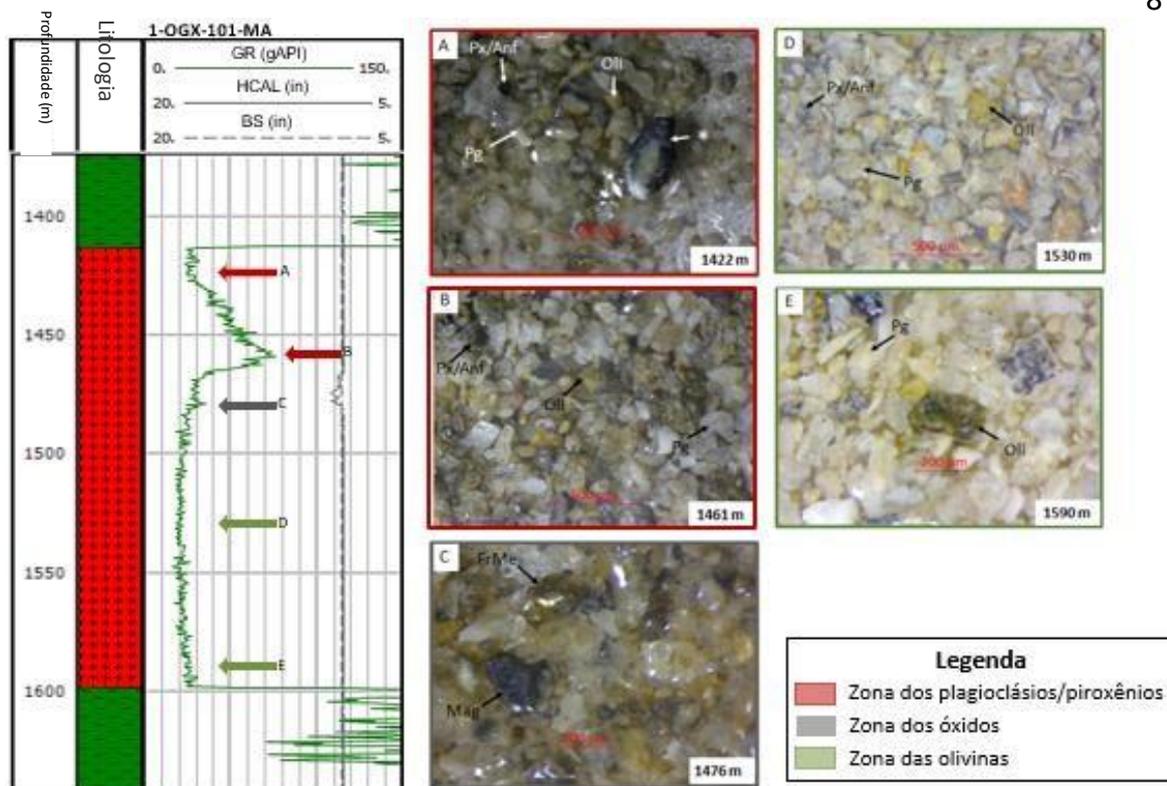
Na metade inferior das soleiras é observado um aumento gradual de cristais de coloração verde a verde amarelado, interpretados como olivina (Figuras 45, 46, 47 e 48). Esses minerais podem ser vistos em abundância nos intervalos 1533 a 1590 m do poço 1-OGX-101-MA, 1602 a 1632 m do 4-OGX-49-MA e 1917 a 1941 m do poço 1-OGX-93-MA.

As feições "barriguda" dos três poços são caracterizadas pelo aumento de minerais máficos (olivinas e piroxênios) na base da soleira. No topo, esses minerais são encontrados em aproximadamente 20 a 40% da calha, enquanto na base são encontrados em cerca de 40 a 80% da calha.

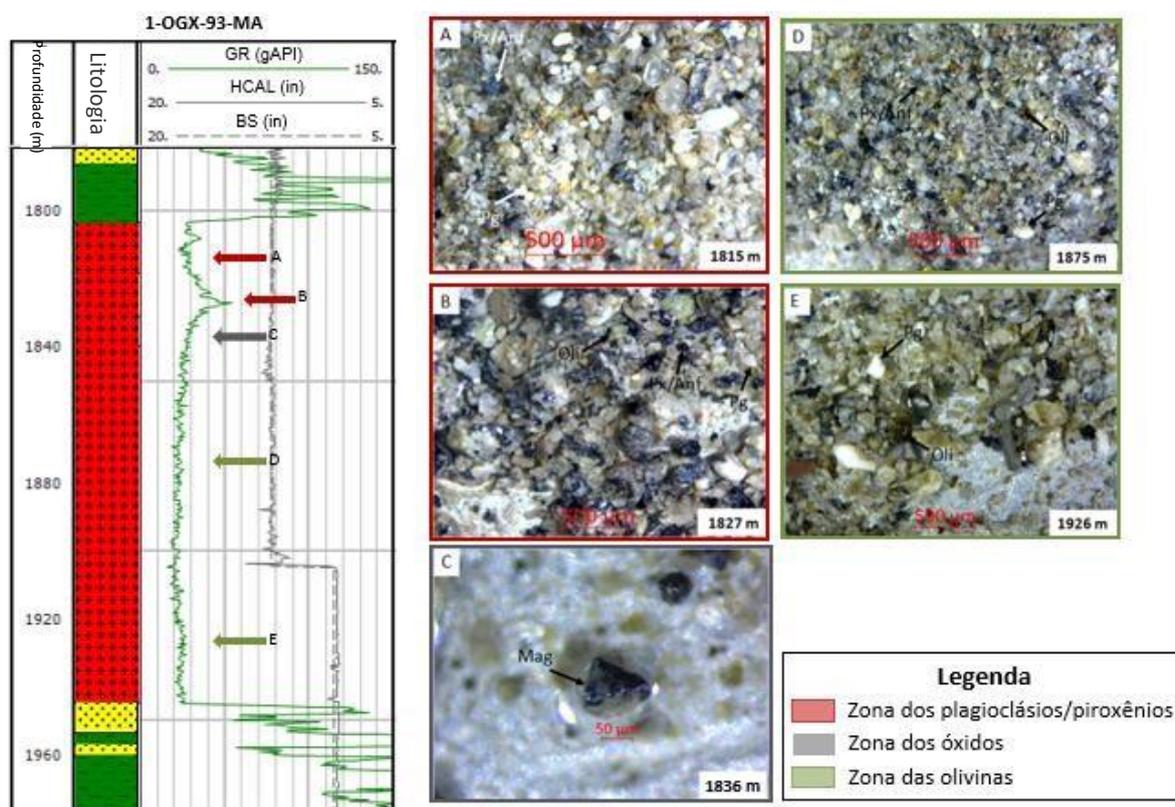
Comparando as características das amostras de calha das três feições "barriguda" descritas, é possível observar algumas diferenças na coesão e tamanho dos grãos de diabásio. No poço 1-OGX-101-MA encontram-se cristais mais finos, da

ordem de 100  $\mu\text{m}$  e os minerais félsicos apresentam coesão mole. Nos poços 4-OGX49-MA e 1-OGX-93-MA são identificados cristais maiores, de aproximadamente 400  $\mu\text{m}$  e minerais máficos e félsicos com dureza maior. Vale ressaltar que as características referentes ao tamanho dos grãos estão associadas ao tamanho no qual os cristais foram moídos, podendo, assim, ser indicativo da geologia ou apenas ocasionado pela broca durante a perfuração.

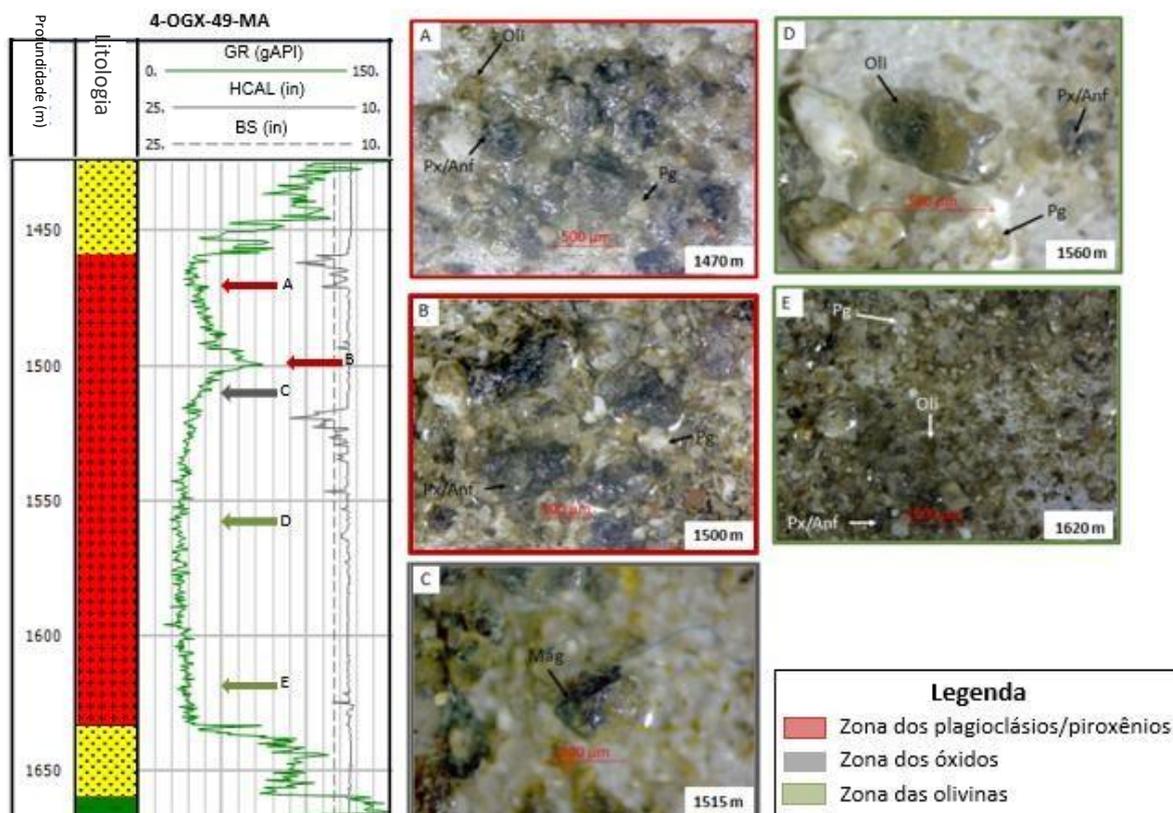
Na feição “caixote” são encontrados minerais máficos e félsicos euédricos com as mesmas características de coloração, brilho e clivagem dos minerais encontrados na feição “barriguda” e, portanto, também foram interpretados como piroxênio e plagioclásio. São observados cristais subédricos de coloração esverdeada, também interpretados como olivina. Nas calhas, os três minerais são encontrados na mesma proporção em toda a intrusão, sugerindo que se trata de um corpo ígneo homogêneo, com características mineralógicas semelhantes desde o topo até a base.



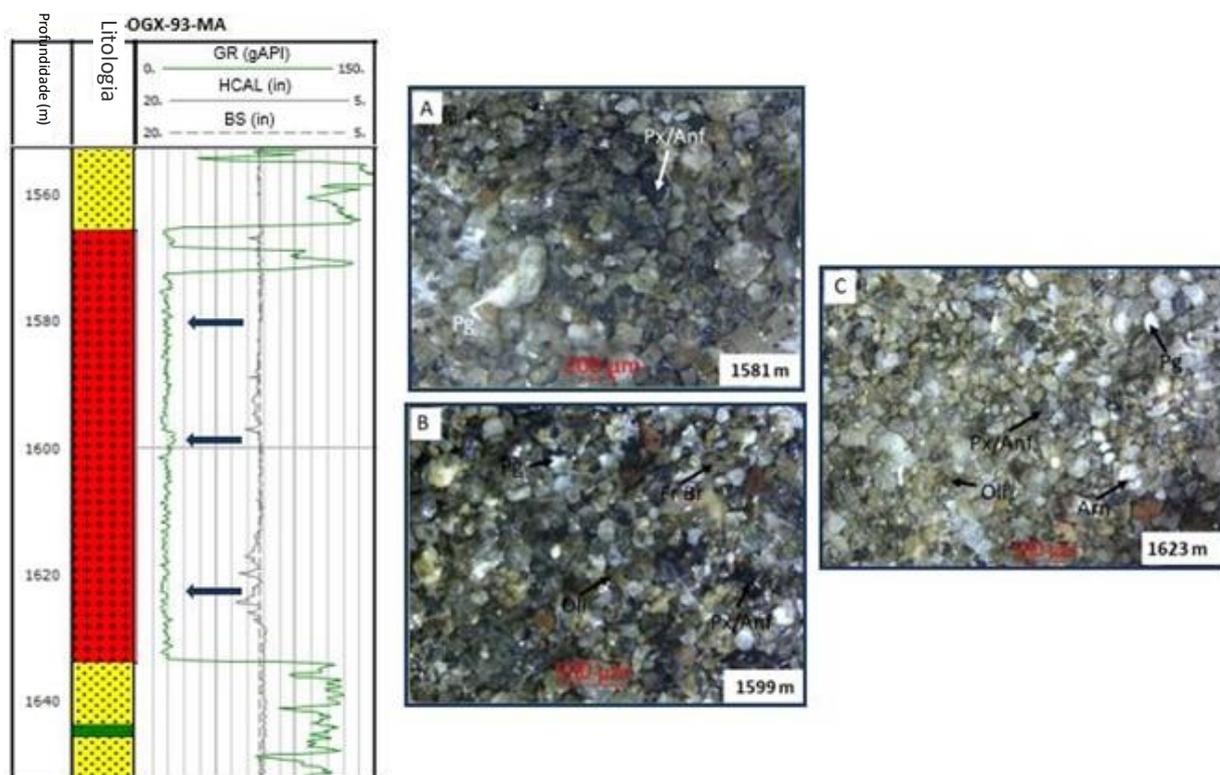
**Figura 45:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “barriguda” do poço 1-OGX-101-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) Topo da soleira, rica em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina; (C) Zona dos óxidos com presença de óxidos; (D) e (E) Zona das olivinas, na porção basal da soleira, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e olivina.



**Figura 46:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “barriguda” do poço 1-OGX-93-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) Topo da soleira, rica em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina; (C) Zona dos óxidos com presença de óxidos; (D) e (E) Zona das olivinas, na porção basal da soleira, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e olivina.

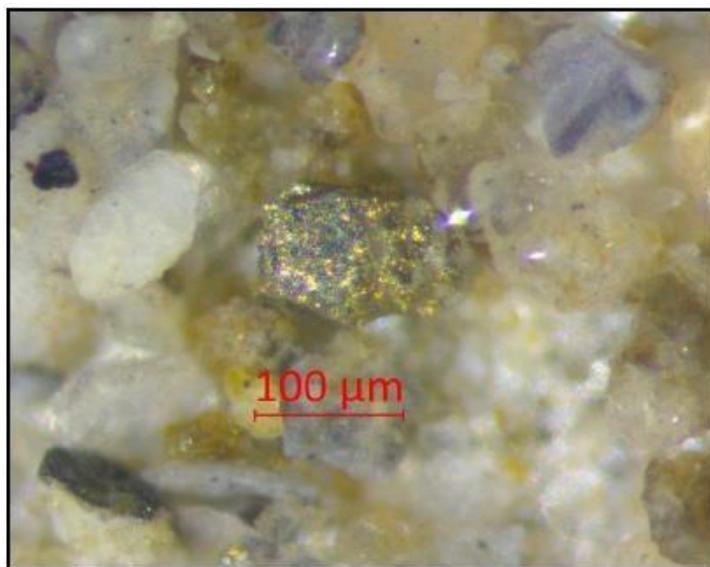


**Figura 47:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “barriguda” do poço 4-OGX-49-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) Topo da soleira, rica em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina; (C) Zona dos óxidos com presença de óxidos; (D) e (E) Zona das olivinas, na porção basal da soleira, rica em plagioclásio, piroxênio/anfibólio e olivina.



**Figura 48:** Fotos das amostras de calha correspondentes à soleira de diabásio de feição “caixote” do poço 1-OGX-93-MA e suas respectivas profundidades. (A) e (B) e (C) ricas em plagioclásio e piroxênio/anfibólio, com alguma ocorrência de olivina.

Na maioria das amostras descritas foram encontradas partes sólidas do fluido de perfuração e fragmentos metálicos, de coloração dourada, oriundos da perfuração dos poços, possivelmente associados aos fragmentos de broca, de tubos do revestimento e/ou de tubos de perfuração (Figura 49).



**Figura 49:** Foto de fragmento metálico oriundo da perfuração do poço encontrada na amostra de calha do poço 1-OGX-101-MA, profundidade 1476 m.

No intervalo de 1485 a 1497 m do poço 1-OGX-101-MA e de 1887 a 1902 m do poço 1-OGX-93-MA foi observada uma grande quantidade de calcita euédrica, referente ao tampão de combate à perda de circulação, durante a perfuração, como explicado por De Oliveira *et al.* (2022). Na profundidade 1491 m do poço 1-OGX-101-MA a calcita representa 50% dos fragmentos totais da calha (Figura 50) e 40% na profundidade de 1890 m do poço 1-OGX-93-MA. No FRX, a presença da calcita nas amostras responde com o aumento anômalo da concentração de Cálcio e Estrôncio, reduzindo a concentração dos demais elementos (De Oliveira *et al.*, 2022).



**Figura 50:** Calcita de tampão de combate à perda de circulação encontrada na amostra de calha do poço 1-OGX-101-MA, profundidade 1491 m.

Na amostra da profundidade 1611 m do poço 1-OGX-93-MA foi observado uma grande concentração de material componente do fluido de perfuração, sendo essa calha composta por 90% de fluido de perfuração e apenas 10% de diabásio (Figura 51), acarretando no aumento da concentração de potássio, cálcio, rubídio e estrôncio e diminuição dos demais elementos químicos nas análises de FRX. Visualizar essas variações e alterações nas calhas ajudam a entender o comportamento das curvas dos perfis de poços e dos elementos químicos na fluorescência de raios-x.

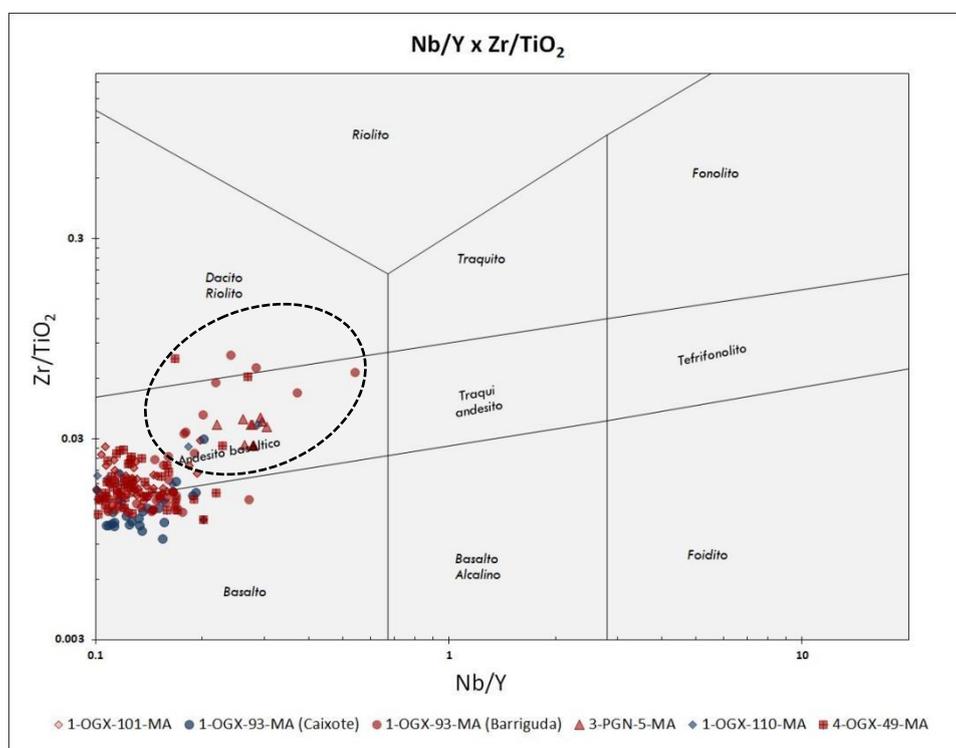


**Figura 51:** Material componente do fluido de perfuração encontrado na amostra de calha do poço 1-OGX-93-MA na profundidade de 1608 m.

### 7.3. Fluorescência de Raios-X em Amostras de Calha

As análises de FRX nas amostras de calha dos poços 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-122-MA, 3-PGN-5-MA e 4-OGX-49-MA forneceram informações importante sobre a composição das soleiras de diabásio, com base nas variações químicas elementares. O método utilizado para classificar as rochas ígneas foi o diagrama de Pearce *et al.*, (2014) (Figura 52), que correlaciona a razão Nb/Y com Zr/TiO<sub>2</sub>, visto que o diagrama TAS utiliza os teores de Na, que não são detectados pelo equipamento de FRX utilizado neste trabalho.

As amostras caem predominantemente no campo dos basaltos e dos andesitos basálticos, sendo que algumas se estendem para as zonas de dacitos/riolitos (Figura 52).



**Figura 52:** Diagrama de Pearce que correlaciona os valores de Nb/Y X Zr/TiO<sub>2</sub> utilizado para classificação de rochas ígneas básicas. O círculo pontilhado indica as amostras referentes à zona de anomalia de GR.

Foram plotadas as curvas dos elementos químicos mais abundantes encontrados nos minerais observados em calha. Assim, foi possível classificar as intrusões de feição “caixote” como um corpo ígneo com pouca variação química (Anexo C) e separar as soleiras de feição “barriguda” em quatro quimiofacies distintas,

igualmente identificadas em todos os poços analisados (Anexo C). Os valores das profundidades são apresentados em cota para viabilizar a correlação de poços e por se tratar de um método de análise qualitativa, as curvas são apresentadas sem escala.

As intrusões com feição “caixote” são caracterizadas por valores moderados de todos os elementos químicos, mantendo-se relativamente constantes desde o topo até a base, sugerindo a ocorrência de uma intrusão homogênea em termos de composição química. Nas intrusões com feição “barriguda” são identificadas variações químicas, dividindo-as em quatro quimiofacies, descritas a seguir:

**Zona rica em plagioclásio + piroxênio:** Nessa quimiofacies, os valores moderados dos elementos indicam uma zona sem muita variação mineralógica. O comportamento das curvas nessa quimiofacies foi utilizada como base para as análises qualitativas do restante da soleira.

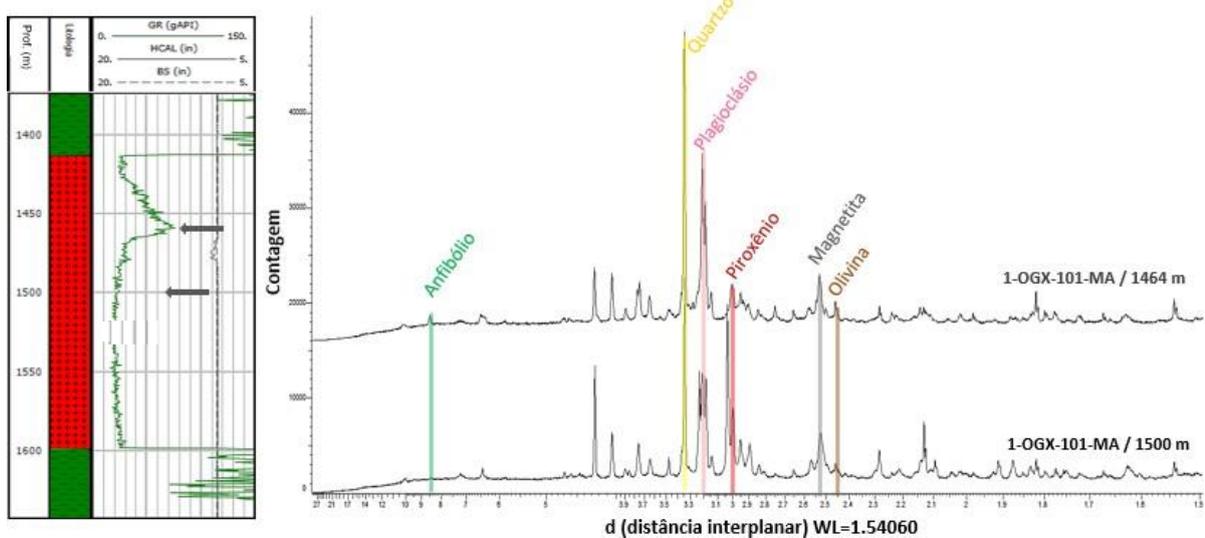
**Zona rica em elementos incompatíveis:** Essa quimiofacies é marcada pelo aumento da concentração de Potássio (K), Rubídio (Rb), Fósforo (P), Ítrio (Y) e Zircônio (Zr), caracterizando uma zona de cristalização dos elementos incompatíveis. Observa-se também o aumento do teor de Silício (Si) nessa quimiofacies.

**Zona rica em Fe e Ti:** Essa quimiofacies é caracterizada por uma maior concentração de Ferro (Fe) e Titânio (Ti), enquanto todos os outros elementos voltam a apresentar valores moderados.

**Zona rica em Mg, Cr e Ni:** Nessa quimiofacies observa-se o aumento significativo de Magnésio (Mg), Cromo (Cr) e Níquel (Ni). Na parte basal da soleira, assim como no topo, também é observado o aumento da concentração de Cálcio (Ca).

#### **7.4. Difração de Raios-X em Amostras de Calha**

As análises de difração de raios-X foram utilizadas para confirmar a mineralogia sugerida a partir das descrições das amostras de calha e das análises de FRX. As amostras analisadas do poço 1-OGX-101-MA na feição “barriguda” confirmaram a presença de plagioclásio, piroxênio, anfibólio, olivina, magnetita e quartzo (Figura 53). O anfibólio foi encontrado apenas na amostra referente à zona de anomalia de GR, rica em K, Rb, P, Y e Zr.



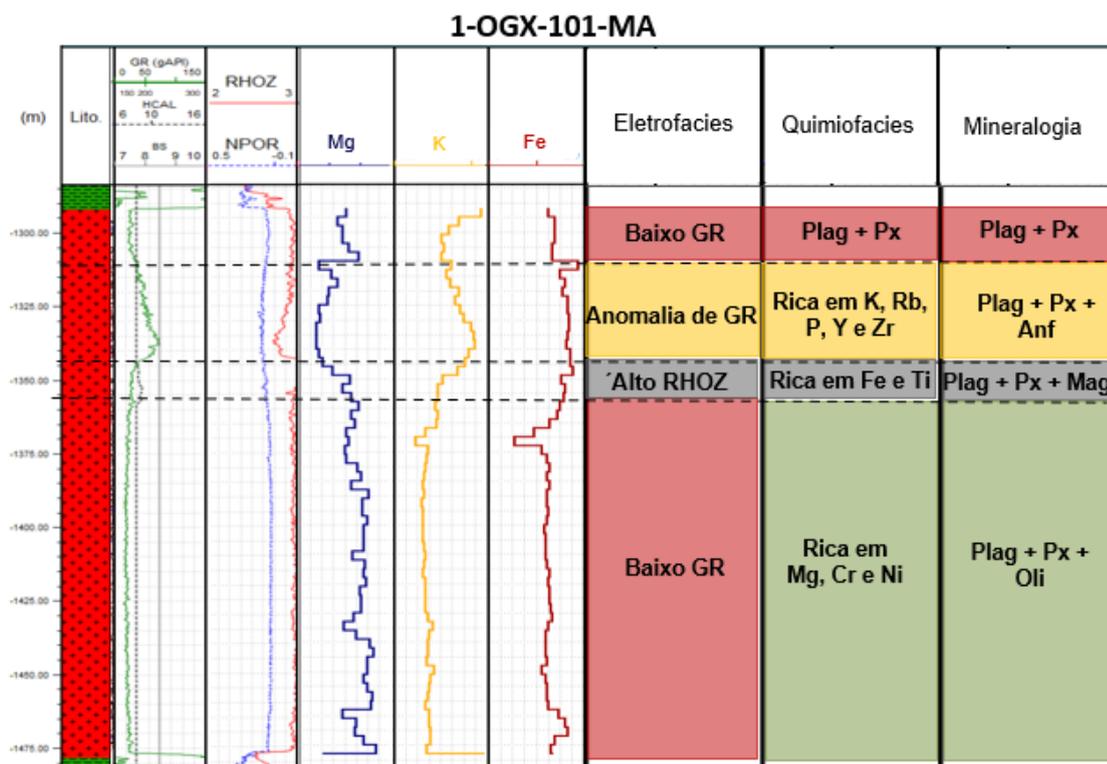
**Figura 53:** Difratomogramas de amostras de calha do poço 1-OGX-101-MA em uma soleira com a “feição barriguda”, na zona da anomalia de GR e na zona dos óxidos, respectivamente.

## 8. Discussões

A correlação dos resultados obtidos com perfis de poços (item 7.1), descrições das amostras de calha (item 7.2), fluorescência (item 7.3) e difração de raios-X (item 7.4) permitiu propor uma interpretação sobre as variações internas das soleiras com feição “barriguda”. As fácies definidas através desses métodos são correlacionáveis entre si (Figura 54), em que a zona rica em plagioclásio + piroxênio e a zona rica em olivina se correlacionam com a eletrofacies de baixo GR obtida através dos perfis de poços. O aumento de Mg, Cr e Ni na base da soleira provavelmente está associado ao aumento de olivina magnesiânica nessa porção, sendo os valores de Cr e Ni possivelmente devido às variações da olivina magnesiânica, enriquecida pelos íons divalentes  $Cr^{2+}$  e  $Ni^{2+}$  em substituição ao  $Mg^{2+}$  (Sial & McReath, 1984, Marsh, 2015).

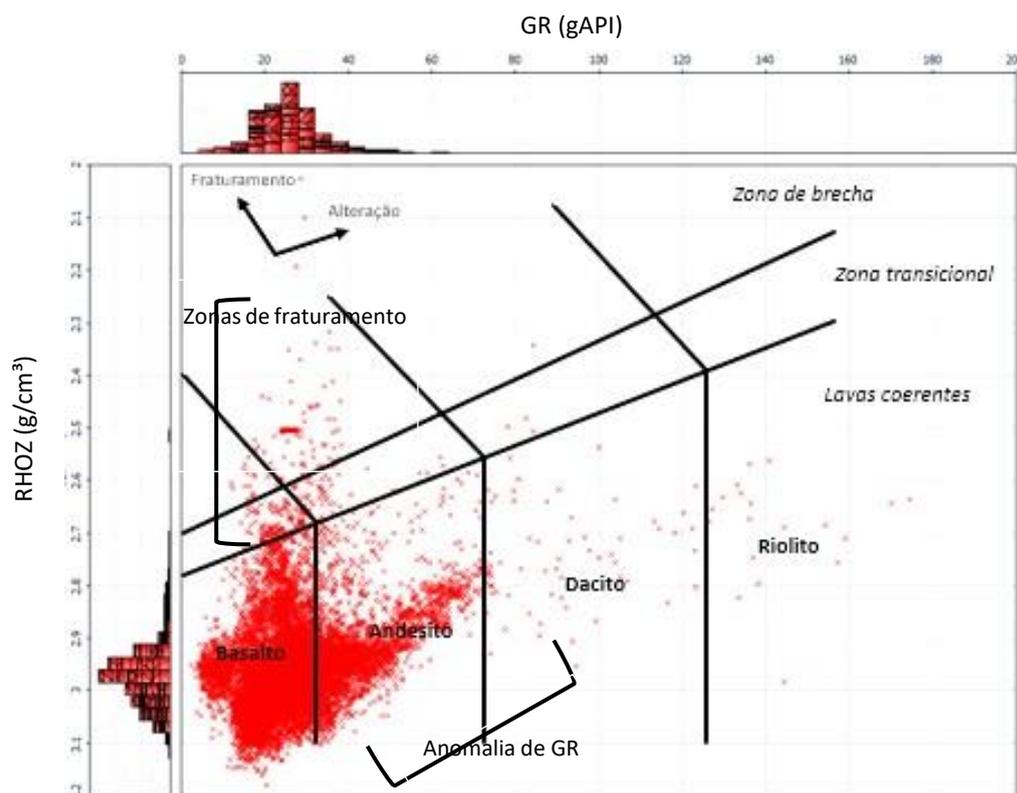
A zona rica em elementos incompatíveis (K, Rb, P, Y e Zr) obtida no FRX se correlaciona com a zona de anomalia de GR, onde o DRX constatou presença principalmente de piroxênio, plagioclásio e anfibólio. Segundo Sial & McReath (1984), a maior concentração de K associado ao aumento do Rb sugerem a presença de antiperititas nos plagioclásios mais sódicos, o P indica ocorrência de apatitas e o Zr está ligado à presença de Zircão.

A zona rica em óxidos se correlaciona com a eletrofacies de alta densidade e com a zona de óxidos identificadas a partir da descrição das amostras de calha (Figura 54). Nessa zona é observado o aumento de Fe e Ti, sugerindo a ocorrência de óxidos ricos nesses elementos como, por exemplo, magnetita identificada na amostra de calha (Figuras 45, 46 e 47) ou ilmenita.



**Figura 54:** Correlação das facies obtidas através da descrição das amostras de calha, perfis de poços, fluorescência e difração de raios-X do poço 1-OGX-101-MA.

As eletrofacies identificadas a partir dos perfis de poços revelam as variações internas dos corpos ígneos e sugerem a ocorrência de uma diferenciação magmática marcada por diferenças composicionais entre o topo e a base da soleira. Os valores de GR e RHOZ foram utilizados para classificar as rochas ígneas estudadas a partir da reprodução do diagrama de Zou *et al.* (2013). A grande maioria dos dados se encontra na zona dos basaltos, tendo os valores correspondentes à porção de anomalia de GR se estendendo para a zona dos andesitos. Os valores de baixa densidade seguem o *trend* de fraturamento, estando associados a zonas de arrombamento do poço (Figura 55).



**Figura 55:** Crossplot de RHOZ X GR segundo a metodologia de Zou et al., 2013 para classificação das rochas ígneas.

Na Figura 52, as amostras que foram classificadas como dacitos/riolitos correspondem à porção onde ocorre a anomalia de GR, no terço superior das soleiras de feição “barriguda”, tendência também observada no gráfico de RHOZ X GR, de Zou *et al.*, 2013 (Figura 55). Os dados de FRX sugerem que as amostras dessa zona sejam produto de uma diferenciação magmática, devido à maior presença de elementos químicos incompatíveis, que associado à presença de anfibólio apenas nessa zona sugere que se trata de uma zona final de cristalização (Sial & McReath, 1984). O aumento de Zr juntamente ao aumento dos valores de Si também sugerem a existência de uma zona de diferenciação magmática (Sial & McReath, 1984), provavelmente cristalizados em uma fase final de resfriamento. A menor concentração de Mg, Al e Ca está possivelmente relacionada à menor presença de minerais máficos e à predominância de plagioclásios mais sódicos em detrimento aos plagioclásios mais cálcicos, reforçando a ideia de que essa zona se cristalizou em uma fase final de resfriamento magmático, de acordo com a Série de Reações de Bowen (Bowen, 1922; Cox, 1979; Sial & McReath, 1984).

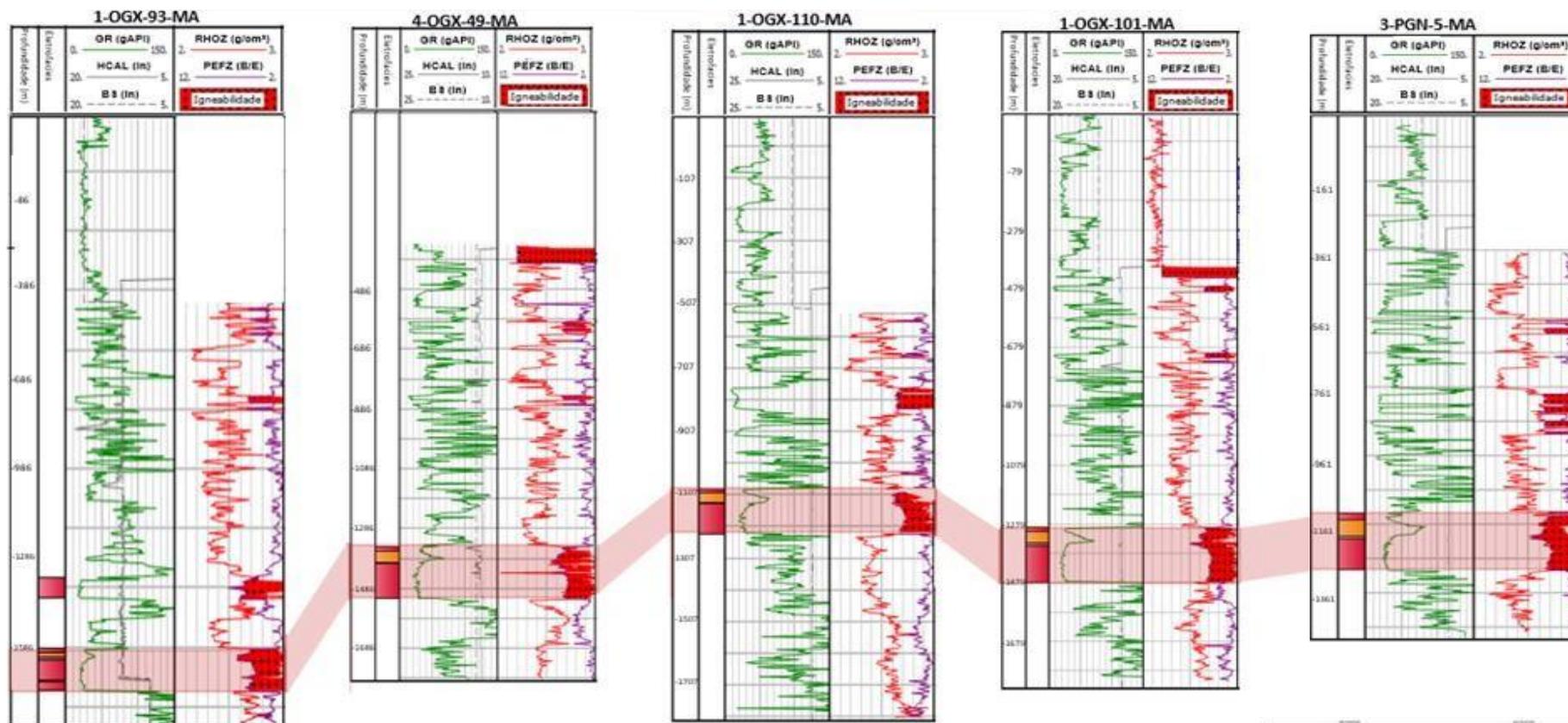
A olivina, por ser um dos minerais que possuem temperatura de cristalização mais alta, é formada em um primeiro momento, submergindo no restante do magma que ainda está no estado pastoso. O aumento de Mg, Cr e Ni em soleiras de diabásio pode estar relacionado ao aumento da concentração de ortopiroxênio ou olivina na base (Marsh, 2015), sendo a olivina observada em calha. A maior concentração desses minerais sugere que a soleira foi gerada a partir de uma diferenciação magmática, que poderia acontecer em duas situações: quando a soleira, durante o seu início de cristalização, recebe um novo aporte magmático ou se o magma já se aloca com a presença de fenocristais (Marsh, 2015).

## 8.2 Correlação de poços

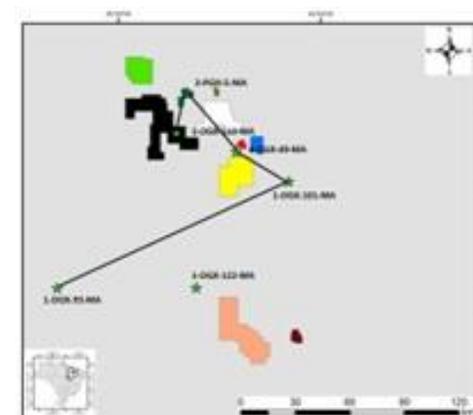
A posição estratigráfica das intrusões e a proximidade relativa entre os poços permitiram sugerir uma correlação entre eles, indicando que todas as feições “barriguda” observadas nos poços estudados sejam indicativas de uma única soleira, com uma extensão lateral de pelo menos 120 km (Figura 56), corroborado pela interpretação sísmica de Leubon (2022).

Utilizando dados de geoquímica e de perfis, Leubon (2022) correlacionou os poços através da amarração poço-sísmica, expandindo essas informações para uma escala regional da Bacia do Parnaíba. A amarração foi feita a partir das curvas de GR, DT, RHOZ, impedância acústica e coeficiente de refletividade dos poços 4-OGX-49-MA e 3-PGN-5-MA. Na zona da anomalia de GR, os valores de RHOZ e DT diminuem, sendo observada a passagem de um pico preto para um pico branco nas amplitudes sísmicas, possivelmente resultado da diferenciação magmática, que se acumulam óxidos e elementos incompatíveis, reduzindo a densidade da soleira, representando um contraste de impedância negativo.

Na saída da soleira, Leubon (2022) observou um pico preto, representando um contraste de impedância positivo, possivelmente devido ao incremento de minerais ferromagnesianos na base da soleira, que aumenta a densidade e conseqüentemente a impedância nessa porção. Os horizontes foram precisamente encontrados pela amarração e propagados através do encontro entre as linhassísmicas, permitindo a interpretação qualitativa mais precisa dos horizontes, identificando a soleira principal da bacia e sua extensão lateral.



**Figura 56:** Identificação dos corpos ígneos utilizando a Feição de Igneabilidade e correlação entre os poços 1-OGX-93-MA, 4-OGX-49-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-101-MA e 3-PGN-5-MA a partir das soleiras de feição “barriguda”.



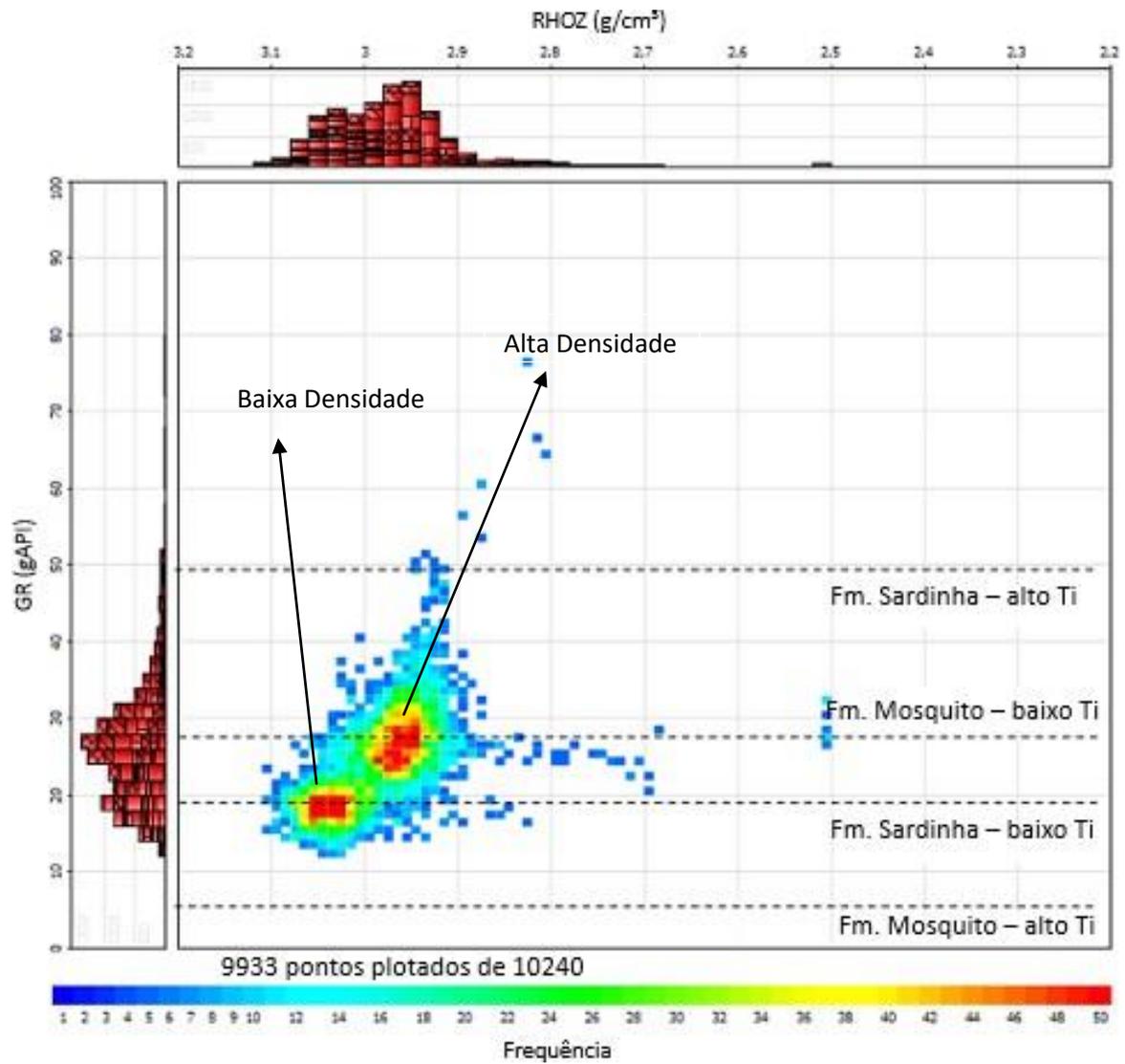
## 8.6 Hipótese de distinção entre Formações Sardinha e Mosquito

A comparação de todos os dados de perfil mostra que os conjuntos intrusivos são separados em dois grupos, descritos a seguir, que não respeitam a divisão entre feição “barriguda” e feição “caixote”, indicando que essa separação pode possuir outro controle.

O primeiro grupo apresenta valores baixos de RHOZ ( $\sim 2.95 \text{ g/cm}^3$ ) e altos de GR ( $\sim 27 \text{ gAPI}$ ), denominado como “Alta Densidade”, enquanto outro conjunto apresenta altos valores de RHOZ ( $\sim 3.09 \text{ g/cm}^3$ ) e baixos valores de GR ( $\sim 18 \text{ gAPI}$ ), denominado como “Baixa Densidade”, conforme apresentado na Figura 57. No conjunto “Alta Densidade” apresentam-se os dados referente às intrusões com feição “barriguda” e algumas soleiras com feição “caixote”, enquanto o conjunto “Baixa Densidade” engloba apenas as intrusões de feição “caixote”.

Os valores de GR das intrusões de alto e baixo Ti foram calculados a partir dos dados de GR espectral disponíveis no trabalho De Oliveira *et al.* (2018). Esses autores utilizam os teores de U, Th e K para separar os basaltos estudados em Sardinha de alto-Ti, Sardinha de baixo-Ti, Mosquito de alto-Ti e Mosquito de baixo-Ti. Utilizando esses dados foi calculado o GR para cada amostra do artigo De Oliveira *et al.*, (2018), mostrando que existe uma tendência dos valores de GR para cada grupo, com a Formação Mosquito de baixo-Ti e alto-Ti apresentando média de 07 gApi e 27 gApi, respectivamente. A Formação Sardinha de alto-ti e baixo-Ti apresentam média de 19 gAPI e 49 gAPI, respectivamente.

A mediana dos valores de GR para basaltos da Formação Mosquito de baixo Ti, definidor por De Oliveira (2018) coincidiu com a mediana de GR para o grupo de “Alta Densidade”, definido neste trabalho. Da mesma forma, os basaltos da Formação Sardinha de baixo Ti de De Oliveira (2018) coincidiu com a mediana de GR para o grupo de “Baixa Densidade” identificado neste estudo. Com isso, deixa-se a hipótese de que valores de GR e RHOZ possam ser usados para distinguir os dois eventos magmáticos Mosquito e Sardinha, apesar de não ter sido possível realizar a datação para comprovação, o que pode ser realizado por futuros trabalhos.



**Figura 57:** Crossplot de frequências de RHOZ x GR mostrando os dois grupos com diferentes valores, o de Alta Densidade, correlacionado com a Formação Mosquito e o de Baixa Densidade, correlacionado com a Formação Sardinha. As linhas pontilhadas correspondem à mediana dos valores de basaltos de baixo e alto Ti para as Formações Mosquito e Sardinha.

## 9 CONCLUSÃO

A integração dos dados de FRX, DRX, perfis de poços e a descrição de amostras de calha de oito poços exploratórios perfurados na região do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba, permitiu a identificação precisa das intrusões ígneas e a caracterização das mesmas. Com base no padrão dos perfis, os quais refletem as diferenças composicionais, foi possível classificar todas as intrusões em feição “caixote” e feição “barriguda”, separá-las em eletrofacies e quimiofacies correlacionáveis entre si e sugerir uma separação entre as formações Mosquito e Sardinha.

Foi observado que os perfis de poços apresentam variações ao longo das intrusões de diabásio estudadas, o que levou a classificá-las, com base em suas propriedades físicas, em duas feições: “barriguda” e “caixote”. As intrusões de feição “caixote” são interpretadas como corpos ígneos de menor espessura, caracterizados pela homogeneidade nos perfis de poços, apresentando baixos valores de GR e altos valores de RHOZ. Em contraste, as feições “barriguda” correspondem a corpos ígneos espessos em que os perfis sofrem variações no terço superior da intrusão, evidenciado pelo aumento dos valores de GR e diminuição de RHOZ nessa porção.

Os dados de perfis mostraram-se eficazes para separar as intrusões de feição “barriguda” em diferentes eletrofacies, as quais são caracterizadas por três zonas com propriedades físicas distintas. Essas eletrofacies são correlacionáveis com os dados de FRX. As intrusões com feição “caixote”, de maneira geral, apresentam valores constantes para todos os elementos químicos, sugerindo a ocorrência de um corpo homogêneo também em termos de composição química, não sendo possível identificar processos de diferenciação após a colocação desse corpo ígneo. Ao longo das soleiras de feição “barriguda”, foram observadas variações nos teores dos elementos químicos, que permitiu sua divisão em quatro quimiofacies. Essas quimiofacies respondem as variações mineralógicas dentro da soleira, onde foi observada uma maior concentração de minerais magnesianos na base e de minerais félsicos no topo. A existência dessas variações mineralógicas dentro da soleira sugere a ocorrência de diferenciação magmática, como por exemplo, cristalização fracionada e posterior decantação e/ou flotação de minerais.

Para todas as intrusões com feição “barriguda” analisadas, as quimiofacies apontam: aumento de Mg, Cr e Ni na base das soleiras, devido ao aumento de olivina magnésiana; aumento de Fe e Ti na porção de alta densidade, que pode refletir a presença de óxidos, os

quais foram identificados nas amostras de calha; acúmulo de elementos incompatíveis, K, P, Rb, Y e Zr na zona de anomalia de GR, caracterizando uma zona de diferenciação magmática; e valores moderados de todos os elementos no topo da soleira.

Essas quimiofacies evidenciam o caráter intrusivo dessas rochas, no qual ocorreu um resfriamento lento e gradual, criando uma zona de diferenciação magmática no terço superior das intrusões de feição “barriguda”. Os dados de DRX e de calha corroboram essa interpretação, mostrando a presença de anfibólio apenas nas amostras referentes à zona de anomalia de GR e confirmando a presença da mineralogia vista em calha: plagioclásio, piroxênio, anfibólio, olivina, magnetita e quartzo. Com isso, sugere-se que o comportamento das curvas dos perfis de poços corresponda à variação mineralógica e composicional ao longo das intrusões que apresentam feição “barriguda”, provavelmente relacionada a processos de decantação dentro da soleira. A diferenciação magmática das soleiras de feição “barriguda” é observada nos dados de FRX, DRX, amostras de calha, perfis de poços

Este trabalho expõe uma metodologia que permitiu compreender as características físicas e químicas ao longo das soleiras de diabásio de feição “barriguda” e “caixote”. Com isso, destaca-se a importância de uma análise integrada para uma melhor compreensão da estrutura e composição das intrusões ígneas. Recomenda-se utilizar essa metodologia e os padrões observados nas intrusões da Bacia do Parnaíba em outras regiões de domínio semelhante, para melhor compreender o princípio por trás das variações dos perfis, favorecer à correlação entre poços e reduzir as incertezas exploratórias acerca dos sistemas petrolíferos associados a rochas ígneas intrusivas.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. **Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados** In: Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.Ed. Beca, p.44-58, São Paulo, 2004.

ANP, Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - **Resolução ANP Nº 71, DE 31.12.2014** - DOU 2.1., 2015.

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Relatório Anual de Exploração**, Superintendência de Exploração – SEP, 2020.

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Relatório Anual de Exploração**, Superintendência de Exploração – SEP, 2021.

ANTONIIASSI, J. L., **A difração de raios-X com o método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas, PA**. Dissertação de Mestrado, Engenharia mineral, Universidade de São Paulo, 2010.

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

ARAÚJO, D. B. **Sumário Geológico e Setores em Oferta: Bacia do Parnaíba**. Superintendência de Definição de Blocos, 13ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás, da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

ARAÚJO, D. B. **Sumário Geológico e Setores em Oferta: Bacia do Parnaíba**. Superintendência de Definição de Blocos, 14ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás, da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2017.

ARCE, A.; CAMPELO, F. M. A. C.; MOURA D. H. L.; RIGOTI, C. A.; SCHUAB, F. B. **Bacia do Parnaíba: Uma Revisão Estratigráfica, Tectônica, Estrutural e Sistemas Petrolíferos**. Trabalho Final de Curso (Curso de Especialização em Projeto de Análise de Bacias: Módulo Geologia do Petróleo). Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

ASSINE, M. L. QUAGLIO, F., WARREN, L. V., SIMÕES, M. G., **Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological**

**perspective**". Brazilian Journal of Geology, v. 46, n. 1, p. 3-7, 2016.

BALTAR, C. A. M. SAMPAIO, J. A., ANDRADE, M. C. **Minerais de Titânio, Rochas e Minerais Industriais**. CETEM, p. 655-676, 2005.

BATES, R. L., JACKSON, J. A., **Glossary of geology**. Publish. American Geological Institute. 2ª ed., Falls Church, Virginia, 1980.

BOND, L. J., HARRIS, R. V., DENSLOW, K. M., MORAN, T. L., GRIFFIN, J. W., SHEEN, D. M., DALE, G. E., & SCHENKEL, T. **Evaluation of non-nuclear techniques for well logging: technology evaluation**. Washington, USA, 2010.

BORN, M. **Atomic physics**. Dover Publications, 8 ed. New York, USA, 1969.

BOWEN, N. L. **The reaction principle in petrogenesis**. The Journal of Geology, 177-198, 1922.

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

CAMPOS JUNIOR, L. M., **Síntese e caracterização de óxidos magnéticos diluídos nanoestruturados preparados por moagem mecânica**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2014.

CAPUTO, M. V., IANNUZZI, R., FONSECA, V. M. M., **Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Parnaíba**. Phoenix, v. 8, p. 1-6, 2005.

CAPUTO, M. V.; Lima, E. C. **Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande – Bacia do Parnaíba**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, 1984.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil**. Tese de Doutorado, University of California, USA, 1984.

CAXITO, F., DIAS, T. G. **Cromo**. Recursos Minerários de Minas Gerais (RMMG), Belo Horizonte, 2018.

CHAMANI, M. A. C., RICCOMINI, C. **Tectônica sinsedimentar no Siluro-Devoniano da Bacia do Parnaíba, Brasil: o papel de grandes estruturas do embasamento na origem e evolução de bacias intracratônicas**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

CONCEIÇÃO, J. C. J., ZALÁN, P. V., DAYAN, H., **Deformações em rochas sedimentares induzidas**

por intrusões magmáticas: classificação e mecanismos de intrusão. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 7, n. 1-4, p. 57-91, Riode Janeiro, 1993.

CORDANI, U. G., MILANI, E. J., THOMAZ FILHO, A. Campos D.A. (eds.). **Tectonic Evolution of South America**. 31st International Geological Congress, p. 855, Rio de Janeiro, 2000.

CORNELIS, K., CORNELIUS JUNIOR, H., **Manual of Mineralogy**. John Wiley & Sons, Inc., Ed. 21, New York, 1993.

COX, K. G. BELL, J. D., PANKHURST, R. J., **The Interpretation of Igneous Rocks**. 2ª ed. p. 12-40, DOI 10.1007/978-94-017-3373-1, 1979.

CRAVEIRO, K. D. E. S. **Well Logging Analysis – Análise de diagrfias em poços na Bacia do Rio Grande do Norte**. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas, Técnico Lisboa, 2013.

CULLITY, B. D., **Elements of X-ray diffraction**. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, University of Nôtre Dame. Published by: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1978.

CUNHA, F. M. B. **Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico**. Dissertação de Mestrado em Geologia. Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal doRio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

CUNHA, P. R. C., *et al.*, **Parnaiba Basin the awakening of a giant**. In: 11 Simpósio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Cartagena de Indias, Colombia, 2012.

DALY, M. C., FUCK, R. A., JULIÀ, J., MACDONALD, D. I. M. & WATTS A. B. **Cratonic basin formation: a case study of the Parnaiba Basin, Brasil**. Geological Society, Special Publications, London, 2018.

DE LIMA, L. F., **Efeito do teor de ferro na síntese de vitrocerâmicos de basalto**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do sul, RS, 2020.

DE OLIVEIRA, F. V. C. S. R. S, GOMES, R. T. M, SILVA, K. M. S. **Identificação de basaltos e diabásios em poços exploratórios de petróleo utilizando perfis de Densidade e Fator Fotoelétrico**. 49º Congresso Brasileiro De Geologia, Petrobrás, Rio De Janeiro, 2018.

DE OLIVEIRA, F. V. C. S. R. S., **Identificação De Fácies Ígneas Intrusivas E Extrusivas Através De Perfis Geofísicos Convencionais A Poço Aberto, Nas Bacias De Santos, Parnaíba E Paraná.** Programa de Pós Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2023.

DE OLIVEIRA, F. V. C. S. R. S., GOMES, R. T. M., DORIZ, C. E., D., SILVA, K. M. S., DE TOLEDO, R. C., **Lithology Identification Through X-Ray Fluorescence (FRX) Analyses on Drill Cuttings Samples During Well Drilling.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, 2022.

DE SOUZA, D. V., KER, J. C., SCHAEFER, C. E. R., RODET, M. J., GUIMARÃES, L. M., FELIX, J. F., **Magnetite originating from bonfires in a Brazilian prehistoric Anthrosol: A micro-Raman approach.** CATENA, p. 552-564, 2018.

DELLA FÁVERA, J. C. **Tempestitos da Bacia do Parnaíba.** Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grandedo Sul, Porto Alegre, 1990.

DELPINO, D. H., BERMÚDEZ, A. M., **Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks.** SEG Library, 2009.

DONOVAN, W. S., **What Causes Mudlogging Mud Gas Response to Vary?** AADE-19-NTCE-050. American Association of Drilling Engineers, Denver, Colorado, USA, 2019.

ELLIS, D. V., & SINGER, J. M. **Well logging for earth scientists.** Ed. Springer, 2ª ed, 2008.

ERNESTO, M., BELLINI, G., PICCIRILLO, E. M., MARQUES, L. S., DE MIN, A., PACCA, I. G., MACEDO, J. W. P., **Paleomagnetic and geochemical constraints on the timing and duration of the CAMP activity in northeastern Brazil.** The Central Atlantic Magmatic Province: Insights from Fragments of Pangea, 2003.

FAGUNDES, T. B., **Caracterização de cascalhos de perfuração d epoços de petróleo por técnicas analíticas instrumentais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI:10.11606/D.3.2018.TDE-16072018-083539.

FERNANDES, R.F. **Estudo da evolução termomecânica da Bacia do Parnaíba.** UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

FERRAZ, N. C., **Análise estratigráfica da sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

FERRETTI, M., **Princípios e aplicações da espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais**. Revista CPC p. 74-98. DOI:10.11606/ISSN.1980-4466. 2009.

FIGUEIREDO, A. M. F., RAJA GABAGLIA, G. P. **Sistema Classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileiras**, 1986.

FONT-ALTABA, M., **Atlas de mineralogia**. Ed. Jover, 3ª ed., Barcelona, 1969.

FORMOSO, M. L. L., **Difratometria de Raios x**. In: GOMES, C. B., Técnicas analíticas instrumentais aplicadas a geologia, Edgard Blucher, p. 1-43, São Paulo, 1984.

FORNERO, S. A., **Caracterização faciológica de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas por meio de perfis de imagem microresistiva e acústica: estudo de caso no pré-sal, bacia de santos**. Programa de Pós Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2018.

FORNERO, S. A., MARINS, G. M., LOBO, J. T., FREIRE, A. F. M., & LIMA, E. F. **Characterization of Subaerial Volcanic Facies Using Acoustic Image Logs: Lithofacies and Log-Facies of a Lava-Flow Deposit in The Brazilian Pre-Salt, Deep Water of Santos Basin**. Marine and Petroleum Geology, 99, p. 156-174, 2019.

GARDIOLI, H. F. G., CATRO-JUNIOR, J. D., GOMES, T. G., CARLETTI, E. Z. B., **Integração De Dados “Geológicos, Geoquímicos E Geofísicos” Utilizada Na Prospecção De Hidrocarbonetos**. Rev. Ambiente Acadêmico - ISSN 2447-7273, vol.1, nº 2, 2015.

GILL, R., **Igneous rocks and processes – A practical guide**. Department of Earth Sciences Royal Holloway University of London, 2010.

GOBBO, L. A., **Aplicação da Difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de Cimento Portland**. Tese de Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, DOI: 10.11606/T.44, 2009.

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

GÓES, A. M. O.; COIMBRA, A. M. **Bacias sedimentares da província sedimentar do meio-norte do Brasil**, In: Boletim de Resumos Expandidos, Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, PA, 1996.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. **Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, Rio de Janeiro, 1994.

GONÇALVES, L. B., **Sistema inteligente de classificação de imagens de rochas macroscópicas para indústria de petróleo e gás**. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2010.

GOULART, J. P. M., **Caracterização de chaminés de gás nas bacias do Parnaíba, Paraná e Tacutu: uma nova ferramenta exploratória**. Dissertação de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

HASUI, Y. & HARALYI, N. L. E. **Aspectos lito-estruturais e geofísicos do soerguimento do Alto Paranaíba**. Revista Geociências, v. 10, p.57-77, 1991.

IBP-PETROBRAS, **Manual de subsuperfície, roteiro básico para o acompanhamento geológico de poços**, Ed. 2, Instituto Brasileiro de Petróleo/ PETROBRAS, Rio de Janeiro, 1981.

INANC, F., ROBERTS, L.P., HAN, X. **Characterization of LWD Nuclear Tools for CsK Formate Drilling Fluid Environments**. Paper Presented at the 52nd Annual SPWLA Logging Symposium, Colorado Springs, Colorado, USA, 2011.

JENKINS, R. **Instrumentation**. In: BISH, D.L.; POST, J.E. (Ed.). Modern powder diffraction. Mineralogy Society of America, Washington, 1989.

JERRAM, D. A., MILLETT, J. M., KÜCK, J., THOMAS, D., PLANKE, S., HASKINS, E., LAUTZE, N., & PIERDOMINICI, S. **Understanding volcanic facies in the subsurface: a combined core, wireline logging and image log data set from the pta2 and kma1 boreholes, big island, hawai'i**. Scientific Drilling, 2019.

JERRAM, D. PERTORD, N., **Field description of Igneous Rocks**. Geological field guide series. Ed. John Wiley & Sons, 2<sup>o</sup> ed., 2011.

JOHNSON, C., AFFOLTER, M. D., INKENBRANDT, P., MOSHER, C., **An Introduction to Geology**. Faculty SaltLake Community College, USA, 2017.

KAHN, H. **Difração de Raios-X**, Departamento de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

KEGEL. **Lineament-tektonik in nordwest-brasilien. Geologischeundschau**. 1965.

KLEIN, C., DUTROW, B., **Manual de ciências dos minerais**. Ed. Bookman, 23ª ed., Porto Alegre, 2012.

KLEIN, C., HURLBUT Jr, C. S., **Manual of mineralogy**. Ed. John Wiley & Sons, 21ª ed., Nova York, 1993.

KLUG, H.P.; ALEXANDER, L.E. **X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials**. 2 ed. New York: John Wiley, 1974.

KRUG, F. J., ROCHA, F. R. P., **Métodos de preparo de amostras para análise elementar**. Sociedade Brasileira de Química, Ed. itSBQ, 2. ed. rev. ampl. p. 586, São Paulo, 2019.

LE MAITRE, R. W., STREICKEISEN, A., ZANETTIN, B., LE BAS, M. J., BONIN, B., BATEMAN, P., BELLINI, G., DUDEK, A., EFREMOVA, S., KELLER, J., LAMEYRE, J., SABINE, P. A., SCHMID, R., SØRENSEN, H., WOOLLEY, A. R. **Igneous rock: a classification and glossary of terms**, Ed. 2, Cambridge: Cambridge University Press, USA, 2002.

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. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Recife, 1978.

LIU, J., WANG, P., ZHANG, Y., BIAN, W., HUANG, Y., TANG, H., & CHEN, X. **Volcanic rock-hosted natural hydrocarbon resources: a review**, 2012.

LUZ, A. D., LINS, F. A. F., **Rochas & minerais industriais**. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM-MCT). p. 413-429, Rio de Janeiro, 2005.

MAGALHÃES, L. A., **Desenvolvimento de Metodologia para Determinação de Sílica Cristalina Respirável para Particulado de Minério Brasileiro por Difração de Raios X**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

MARINI, O. J., FUCK, R. A., DARDENNE, M. A., DANNI, J. C. M. **Província Tocantins: setores central e sudeste**. In: ALMEIDA, F. F. M. & HASSUI, Y. coord. o pré-cambriano do Brasil, p. 205-264, São Paulo, 1984.

MARSH, B. D., **The encyclopedia of Volcanoes**. Department of Earth & Planetary Sciences. Johns Hopkins University, p. 185-201, Baltimore, USA, 2015.

MARZOLLI, A., RENNE, P.R., PICIRILLO, E.M., ERNESTO, M., BELLINI, G., DE MIN, A. **Extensive 200-Million- year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province**. DOI: 10.1126/science.284.5414.616. PMID: 10213679, 1999.

McCUSTER, L. B., Von DREELE, R. B., COX, D. E., LOUËR, D., SCARDI, P., **Rietveld refinement guidelines**. Journal of applied crystallography, v. 32, part. 1, p. 36-50, 1998.

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

MERLE, R. E., MARZOLI, A., BERTRAND, H. REISBERG, L., VERATI, C., ZIMMERMANN, C., CHIARADIA, M., BELLINI, G., ERNESTO, M.  **$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages and Sr–Nd–Pb–Os geochemistry of CAMP tholeiites from Western Maranhão basin (NE Brazil)**, 2011.

MIALL, A. D. **Principles of Sedimentary Basin Analysis**. New York Inc., Springer-Verlag, 1984.

MILANI, E.; BRANDÃO, J.; ZALÁN, P.; GAMBOA, L. **Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas**. Brazilian Journal of Geophysics, SciELOBrasil, 2000.

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

MITTEMEIJER, E. J., SCARDI, P., **Diffraction analysis of the microstructure of materials**. Materials Science, Ed. Springer, 2004.

MOCITAIBA, L. S. R., CASTRO, D. L., OLIVEIRA, D. C. **Cartografia geofísica regional do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba**. Revista do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, v. 17, n. 2, p. 116-192, São Paulo, 2017.

MORIMOTO, N., J. FABRIES, A.K. FERGUSON, I.V. GINZBURG, M. ROSS, F.A. SEIFEIT AND J. ZUSSMAN, **Nomenclature of pyroxenes**, Canadian Mineralogist, Vol. 27, p. 143-156, Canada, 1989.

MORTON-THOMPSON, D., WOODS, A. M. **Development geology reference manual**. Ed. Amer Assn of Petroleum Geologists, 1993.

NASCIMENTO FILHO, V. F., **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-FRX) e por reflexão total (TFRX)**. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ Laboratório de Instrumentação Nuclear, CENA, 1999.

NASCIMENTO, R., MACHADO, J., **Matéria cristalina: minerais, cristais e sistemas cristalinos**. Belém, PA, 2018.

NERY, G. G., **Perfilagem Geofísica em Poço Aberto, Fundamentos básicos com ênfase em petróleo**. Rio de Janeiro, 2004.

NOBRE, J. A., **Interpretação paleodeposicional das formações Poti e Cabeças com base em dados gamaespectrais, obtidos em amostras de calha de poços da área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba**. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2019.

OLIVEIRA, A. L., PIMENTEL, M. M., REINHARDT A. F. & DIÓGENES C. O., **Petrology of Jurassic and Cretaceous basaltic formations from the Parnaíba Basin, NE Brazil: correlations and associations with large igneous provinces**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

OLIVEIRA, D. C. & MOHRIAK, W. U. **Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil**. Marine and Petroleum Geology, p. 351-383, 2003.

OLIVEIRA, M. H. R. COSTA JUNIOR, A. P., MARTINS, R. A., DE SOUZA, J. R. **Descrição de amostras de calha depois de perfurado pela empresa partex brasil no campo colibri, bacia potiguar/RN**. Anais III CONEPETRO. Campina Grande: Realize Editora, 2018.

OYEDOTUN, T. D. T., **X-ray fluorescence (FRX) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview**. Geology, Ecology and Landscapes, vol. 2, p.148-154, 2018.

PARREIRA, P. S., **Metodologia De EDFRX e Aplicações Com Um Sistema Portátil**. Universidade Estadual de Londrina, CCE, Departamento de Física, Londrina, Brasil, 2006.

PEARCE, J. A., CANN, J. R., **Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses**. Earth and Planetary Science Letters, v. 19, p. 290-300, 1973.

PEARCE, J. A., **Immobile Elements Fingerprinting of Ophiolites**. Revista Element, 2014.

PEDROSA JUNIOR, N. C., VIDOTTI, R. M., FUCK, R. A., OLIVEIRA, K. M. L., CASTELO BRANCO, R. M. G., **Structural framework of the Jaibaras Rift, Brasil, based on geophysical data**, Journal of South America, Earth Science, v. 58, p. 318-334, Oxford, 2015.

PEREIRA, R. M., **Interpretação paleodeposicional da Formação Cabeças a partir de dados gamaespectrais de poços da área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba**. Programa de Pós Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2020.

PLANKE, S., RASMUSSEN, T., REY, S. S., & MYKLEBUST, R., **Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins**. The Geological Society of London, v. 6, p. 833-844, 2005.

PORTO, A. L., **Mapeamento sísmico de intrusões ígneas na porção sudeste da Bacia do Parnaíba e suas implicações para um modelo petrolífero não convencional**. Trabalho de Conclusão de curso, Bacharel em Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PRAXEDES, I.F. **Lineamento Transbrasiliano, Contribuição Aerogeofísica, Tectônica e Geocronológica no Setor Nordeste da Faixa Brasília**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RAN, Q., WANG, Y., SUN, Y., YAN, L., TONG, M. **Lithological Identification and Prediction of Volcanic Rock**. In: Volcanic Gas Reservoir Characterization, p. 163 – 201, 2014.

RENAULT, J., MCKEE, C., BARKER, J., **New x-ray diffraction method of additions for crystalline silica**. Analytica Chimica Acta, v. 286, Issue 1, p. 129-133, 1994.

RIDER, M. H., **The geological interpretation of well logs**. Ed. Rider-French Consulting, 2ªed., Sutherland, Scotland, 2002.

RODRIGUES, R. **A Geoquímica Orgânica da Bacia do Parnaíba. Tese de Doutorado em Geociências**. Programade Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

ROSA, H. **Estudo de Caracterização de Eletrofacies por meio de Perfis Geofísicos de Poços e de Amostras de Testemunhos Utilizando Estatística Multivariada**. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, SP, 2006.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS JUNIOR, A. E. **Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro**. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, 2001.

SANTOS M.E.C.M. & CARVALHO M.S.S. **Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís. Reconstituições Paleobiológicas**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2009.

SANTOS, S. E., GAMA, E. M., FRANÇA, R. S., SOUZA, A. S., MATOS, R. P., **Espectrometria de fluorescência de raios-X na determinação de espécies**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, v.9, n.17; p. 3413-3432, Goiânia, 2013.

SASAKI, J. M., BLEICHER, L., **Introdução à difração de raios-X em cristais**. Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2000.

Schön J. H., **Physical Properties of Rocks**. A Workbook (Handbook of Petroleum Exploration and Procedures). Ed. Elsevier, Netherlands, 2011.

SGARBI, G. N. C., **Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas**. Ed. UFMG, 2 ed., p. 183-290, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

SHELLEY, D., **Igneous and metamorphic rocks under the microscope: classification, textures, microstructures and mineral preferred-orientations**, Mineralogical Magazine, 57(388), p.553-553. doi:10.1180/minmag.1993.057.388.25 Londres, 1992.

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

SILVA, G. F., **Modelagens do perfil de densidade aplicados num poço do campo de namorado, bacia de campos**, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2016.

SILVA, G. S., **Estudo cristalográfico de dois derivados N-acilidrazônicos utilizando a difração de raios x**. Dissertação de mestrado, Instituto de Química e Biotecnologia da Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL, 2009.

SOARES, G. A. B., DA COSTA, G. M., AVELAR, A. N., **Quantificação mineralógica de bauxita boehmitica por difração de raios X**. Revista Escola de Minas (REM), p. 41-46, Ouro Preto, MG, 2014.

SOUZA, J. L., **Anomalias Aerogamaespectrométricas (K, U e Th) Da Quadrícula De Araras (Sp) e Suas Relações com Processos Pedogenéticos e Fertilizantes Fosfatados**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1998.

SOUZA, M. F. F., FERNANDES, R. F. F., RAMOS, A. Q., D'ALMEIDA, K. S., DE CASTRO, N. O., VILELA, P. C., LEGGIERI, R. F., CARDOSO, R. A. **Resumo Bibliográfico das Bacias Onshore**. Comitê para Revitalização das Atividades de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Áreas Terrestres, REATE, 2020.

SPERANDIO, D. G., GOMES, C. H., SANTANA, J. P. J., **Investigação de microestruturas e crescimento mineral em olivinas das olhas Flores e Corvo – Portugal: ensaio sobre variação cristaloquímica e mineralogênese**. Revista de Geociências, UNESP, v.39, n.3, p.685-693, 2020.

TARBUCK, E. J., LUTGENS, F. K., **Earth Science**. 13th ed., Pearson Higher Education, Inc., New Jersey, 2012.

TAVARES, M. M., DANTAS, P. R. S., SILVA, H. S., MORAIS, W. A. **Análise comparativa entre dois métodos de obtenção de sílica e alumina em minério de ferro**. ABM week, 45º Redução, 16º Minério de Ferro, 3º Aglomeração, 2015.

THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A. M. P., ANTONIOLI, L. **Magmatismo nas Bacias Sedimentares e sua Influência na Geologia do Petróleo**. Revista Brasileira de Geociências, v.38, n.15, p. 128-137, 2008.

TROSDTORF, I. J, MORAIS NETO, J. M., SANTOS, S. F. & PORTELA FILHO, C. V., **Diques e soleiras na Bacia do Parnaíba: geometria e padrões de alojamento**. B. Geociências. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 261-287, 2014.

ULBRICH, M. N. C., ANDRADE, F. R. D., **Inossilicatos, Guia geral da teoria, exercícios e atividades práticas**. Departamento de Mineralogia e Geotectônica, São Paulo, 2003.

VAZ P.T., REZENDE V.G.A.M., WANDERLEY FILHO J.R., TRAVASSOS W.A.S. **Bacia do Parnaíba**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 2007.

VETORAZZI, A.L.S., **Caracterização Geológica dos Arenitos da Formação Cabeças (Devoniano) Na Borda Leste da Bacia do Parnaíba**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

WARREN, B. E., **X-ray diffraction**. Series in metallurgy and materials, 2012.

WINTER, J. D. **An introduction to igneous and metamorphic petrology**. Department of Geology, Whitman College, Ed. Prentice-Hall, p. 181-218, EUA, 2001.

WIRTH, K., COLLEGE, M., BARTH, A. **X-Ray Fluorescence (FRX)**. Macalester College and Andy Barth, Indiana University Purdue University, Indianapolis, USA, 2009.

ZALÁN, P. V. **Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras**. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 595-612, Ed. Beca, São Paulo, 2004.

ZOU, C., GUOSHENG, Z., ZHI, Y., SHIZHEN, T., LIANHUA, H., RUKAI, Z., & ZHIPING, W. **Volcanic reservoirs and hydrocarbon accumulations: on unconventional petroleum geology**. Petroleum Exploration and Development, p. 223-273, 2013.

## 11 ANEXOS

## ANEXO A: Resumo estatístico dos dados de perfis.

| 1-OGX-93-MA               |         |         |        |        |           |         |        |        |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
|                           | Caixote |         |        |        | Barriguda |         |        |        |
|                           | Média   | Mediana | Mínimo | Máximo | Média     | Mediana | Mínimo | Máximo |
| <b>Espessura</b>          | 28.50   | 21.79   | 1.53   | 78.79  | 97.38     | 97.38   | 51.36  | 143.41 |
| <b>Raios Gama</b>         | 17.40   | 17.12   | 12.62  | 35.14  | 25.71     | 23.48   | 14.13  | 136.26 |
| <b>Densidade</b>          | 2.98    | 3.02    | 2.57   | 3.12   | 2.97      | 2.97    | 2.44   | 3.11   |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | 5.70    | 5.70    | 3.36   | 7.12   | 5.29      | 5.12    | 3.08   | 6.49   |

| 3-PGN-5-MA                |         |         |        |        |           |         |        |        |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
|                           | Caixote |         |        |        | Barriguda |         |        |        |
|                           | Média   | Mediana | Mínimo | Máximo | Média     | Mediana | Mínimo | Máximo |
| <b>Espessura</b>          | 16.26   | 19.82   | 3.05   | 25.91  | 157.12    | 157.12  | 157.12 | 157.12 |
| <b>Raios Gama</b>         | 20.57   | 19.88   | 15.56  | 32.57  | 39.16     | 31.29   | 22.19  | 85.47  |
| <b>Densidade</b>          | 3.02    | 3.03    | 2.63   | 3.09   | 2.94      | 2.95    | 2.55   | 3.09   |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | 5.53    | 5.53    | 3.32   | 7.25   | 5.35      | 5.25    | 2.43   | 6.97   |

| 1-OGX-101-MA              |         |         |        |        |           |         |        |        |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
|                           | Caixote |         |        |        | Barriguda |         |        |        |
|                           | Média   | Mediana | Mínimo | Máximo | Média     | Mediana | Mínimo | Máximo |
| <b>Espessura</b>          | -       | -       | -      | -      | 185.32    | 185.32  | 185.32 | 185.32 |
| <b>Raios Gama</b>         | -       | -       | -      | -      | 29.33     | 24.02   | 15.78  | 76.50  |
| <b>Densidade</b>          | -       | -       | -      | -      | 2.96      | 2.97    | 2.73   | 3.09   |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | -       | -       | -      | -      | 5.22      | 5.01    | 4.49   | 7.18   |

| 4-OGX-49-MA               |         |         |        |        |           |         |        |        |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
|                           | Caixote |         |        |        | Barriguda |         |        |        |
|                           | Média   | Mediana | Mínimo | Máximo | Média     | Mediana | Mínimo | Máximo |
| <b>Espessura</b>          | -       | -       | -      | -      | 176.63    | 176.63  | 176.63 | 176.63 |
| <b>Raios Gama</b>         | -       | -       | -      | -      | 32.09     | 29.13   | 15.29  | 74.52  |
| <b>Densidade</b>          | -       | -       | -      | -      | 2.92      | 2.92    | 2.03   | 3.10   |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | -       | -       | -      | -      | 5.23      | 5.06    | 2.24   | 7.16   |

| 1-OGX-110-MA              |         |         |        |        |           |         |        |        |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
|                           | Caixote |         |        |        | Barriguda |         |        |        |
|                           | Média   | Mediana | Mínimo | Máximo | Média     | Mediana | Mínimo | Máximo |
| <b>Espessura</b>          | 11.67   | 2.44    | 1.98   | 47.85  | 139.14    | 139.14  | 139.14 | 139.14 |
| <b>Raios Gama</b>         | 18.30   | 16.65   | 11.24  | 34.65  | 32.26     | 27.08   | 17.28  | 74.24  |
| <b>Densidade</b>          | 3.00    | 3.03    | 2.53   | 3.10   | 2.95      | 2.96    | 2.76   | 3.06   |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | 5.39    | 5.51    | 2.55   | 5.89   | 5.18      | 5.08    | 3.97   | 6.88   |

| <b>1-OGX-122-MA</b>       |              |                |               |               |              |                |               |               |
|---------------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
|                           | Caixote      |                |               |               | Barriguda    |                |               |               |
|                           | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
| <b>Espessura</b>          | 12.43        | 3.20           | 0.30          | 112.30        | -            | -              | -             | -             |
| <b>Raios Gama</b>         | 28.11        | 28.18          | 13.08         | 46.35         | -            | -              | -             | -             |
| <b>Densidade</b>          | 2.94         | 2.94           | 2.57          | 3.07          | -            | -              | -             | -             |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | 5.06         | 5.02           | 2.96          | 5.97          | -            | -              | -             | -             |

| <b>4-PGN-14-MA</b>        |              |                |               |               |              |                |               |               |
|---------------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
|                           | Caixote      |                |               |               | Barriguda    |                |               |               |
|                           | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
| <b>Espessura</b>          | 2.21         | 2.21           | 1.22          | 3.20          | 132.74       | 132.74         | 132.74        | 132.74        |
| <b>Raios Gama</b>         | 15.25        | 14.26          | 10.58         | 38.72         | 35.40        | 27.71          | 15.85         | 86.20         |
| <b>Densidade</b>          | 2.98         | 3.01           | 2.55          | 3.07          | 2.94         | 2.96           | 2.74          | 3.06          |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | 6.46         | 6.57           | 6.00          | 6.70          | 5.36         | 5.17           | 4.69          | 6.61          |

| <b>1-OGX-118-MA</b>       |              |                |               |               |              |                |               |               |
|---------------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
|                           | Caixote      |                |               |               | Barriguda    |                |               |               |
|                           | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
| <b>Espessura</b>          | 34.00        | 34.00          | 34.00         | 34.00         | 140.00       | 140.00         | 140.00        | 140.00        |
| <b>Raios Gama</b>         | 17.28        | 17.21          | 12.66         | 22.34         | 29.56        | 26.56          | 16.81         | 63.37         |
| <b>Densidade</b>          | 3.05         | 3.05           | 2.83          | 3.10          | 2.93         | 2.95           | 2.69          | 3.08          |
| <b>Fator Fotoelétrico</b> | 5.50         | 5.52           | 4.17          | 5.81          | 5.11         | 4.98           | 4.47          | 6.71          |

## ANEXO B: Descrições completas das amostras de calha

## 4-OGX-49-MA

| Profundidade | Litologia | Cor     | Granulometria | Estrutura | Coesão  | Composição |         |                | Mineralogia   |
|--------------|-----------|---------|---------------|-----------|---------|------------|---------|----------------|---------------|
|              |           |         |               |           |         | Máfico     | Félsico | Máfico/Félsico |               |
| 1464 m       | DIA 10%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | -          | -       |                |               |
| 1467 m       | DIA 10%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | -          | -       |                |               |
| 1470 m       | DIA 20%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | -          | -       |                | OLI RAR       |
| 1473 m       | DIA 20%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | -          | -       |                | OLI TRC       |
| 1476 m       | DIA 10%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | -          | -       |                |               |
| 1479 m       | DIA 30%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                | OLI RAR       |
| 1482 m       | DIA 40%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 10%        | 90%     |                |               |
| 1485 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 10%        | 90%     |                |               |
| 1488 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                |               |
| 1491 m       | DIA 70%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 20%        | 80%     |                | OLI TRC       |
| 1494 m       | DIA 70%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                |               |
| 1497 m       | DIA 70%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                |               |
| 1500 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 20%        | 80%     |                | OLI TRC       |
| 1503 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                | OLI TRC       |
| 1506 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                |               |
| 1509 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                |               |
| 1512 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                | OLI TRC/OXI T |
| 1515 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                | OLI TRC/OXI T |
| 1518 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI 10%       |
| 1521 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                |               |
| 1524 m       | DIA 70%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |               |
| 1527 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |               |
| 1530 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |               |
| 1533 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                |               |
| 1536 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                |               |
| 1539 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |               |
| 1542 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                |               |
| 1545 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                |               |
| 1548 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 70%        | 30%     |                | OLI 10%       |
| 1551 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 40%        | 60%     |                |               |
| 1554 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 60%        | 40%     |                | OLI 10%       |
| 1557 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 50%        | 50%     |                | OLI 10%       |
| 1560 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 70%        | 30%     |                | OLI 10%       |
| 1563 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 70%        | 30%     |                | OLI 10%       |
| 1566 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |               |
| 1569 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |               |
| 1572 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 10%       |
| 1575 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |               |
| 1578 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |               |
| 1581 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |               |
| 1584 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |               |
| 1587 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%       |
| 1590 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%       |
| 1593 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | DRO     | 20%        | 80%     |                |               |
| 1596 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |               |
| 1599 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 10%       |
| 1602 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%       |
| 1605 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 10%       |
| 1608 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 20%       |
| 1611 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 20%       |
| 1614 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%       |
| 1617 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%       |
| 1620 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%       |
| 1623 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 20%       |
| 1626 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%       |
| 1629 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 20%       |
| 1632 m       | DIA 60%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | 80%        | 20%     |                | OLI 20%       |
| 1635 m       | DIA 10%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR     | -          | -       |                |               |

## 1-OGX-101-MA

| Profundidade | Litologia | Cor     | Granulometria | Estrutura | Coesão  | Composição |         |                | Mineralogia      |
|--------------|-----------|---------|---------------|-----------|---------|------------|---------|----------------|------------------|
|              |           |         |               |           |         | Máfico     | Félsico | Máfico/Félsico |                  |
| 1413 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                |                  |
| 1416 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 20%        | 80%     |                |                  |
| 1419 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI TRC          |
| 1422 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI TRC          |
| 1425 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                | OLI TRC          |
| 1428 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 20%        | 80%     |                | OLI TRC          |
| 1431 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 20%        | 80%     |                | OLI 10%          |
| 1434 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                |                  |
| 1437 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI TRC          |
| 1440 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                |                  |
| 1443 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                |                  |
| 1446 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                |                  |
| 1449 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 20%        | 80%     |                |                  |
| 1452 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                |                  |
| 1455 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                |                  |
| 1458 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI 10%          |
| 1461 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                |                  |
| 1464 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                |                  |
| 1467 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                |                  |
| 1470 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                |                  |
| 1473 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                | OXI TRC          |
| 1476 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OXI TRC          |
| 1479 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI TRC          |
| 1482 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                | OLI 10%          |
| 1485 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI TRC/ CAL 10% |
| 1488 m       | DIA 70%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI RAR/ CAL 30% |
| 1491 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI TRC/ CAL 50% |
| 1494 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI TRC/CAL 20%  |
| 1497 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 10%/CAL 10%  |
| 1500 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI TRC/CAL TRC  |
| 1503 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%/CAL TRC  |
| 1506 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 10%/CAL TRC  |
| 1509 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1512 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1515 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 10%          |
| 1518 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%          |
| 1521 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%          |
| 1524 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 20%          |
| 1527 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%          |
| 1530 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%          |
| 1533 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 30%          |
| 1536 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 30%          |
| 1539 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1542 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1545 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 20%          |
| 1548 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI 20%          |
| 1551 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1554 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 80%        | 20%     |                | OLI 20%          |
| 1557 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 10%          |
| 1560 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%          |
| 1563 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1566 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 20%          |
| 1569 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 20%          |
| 1572 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 10%          |
| 1575 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%          |
| 1578 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                | OLI 20%          |
| 1581 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                | OLI 20%          |
| 1584 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                | OLI 20%          |
| 1587 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI 20%          |
| 1590 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI 20%          |

## 1-OGX-93-MA (Barriguda)

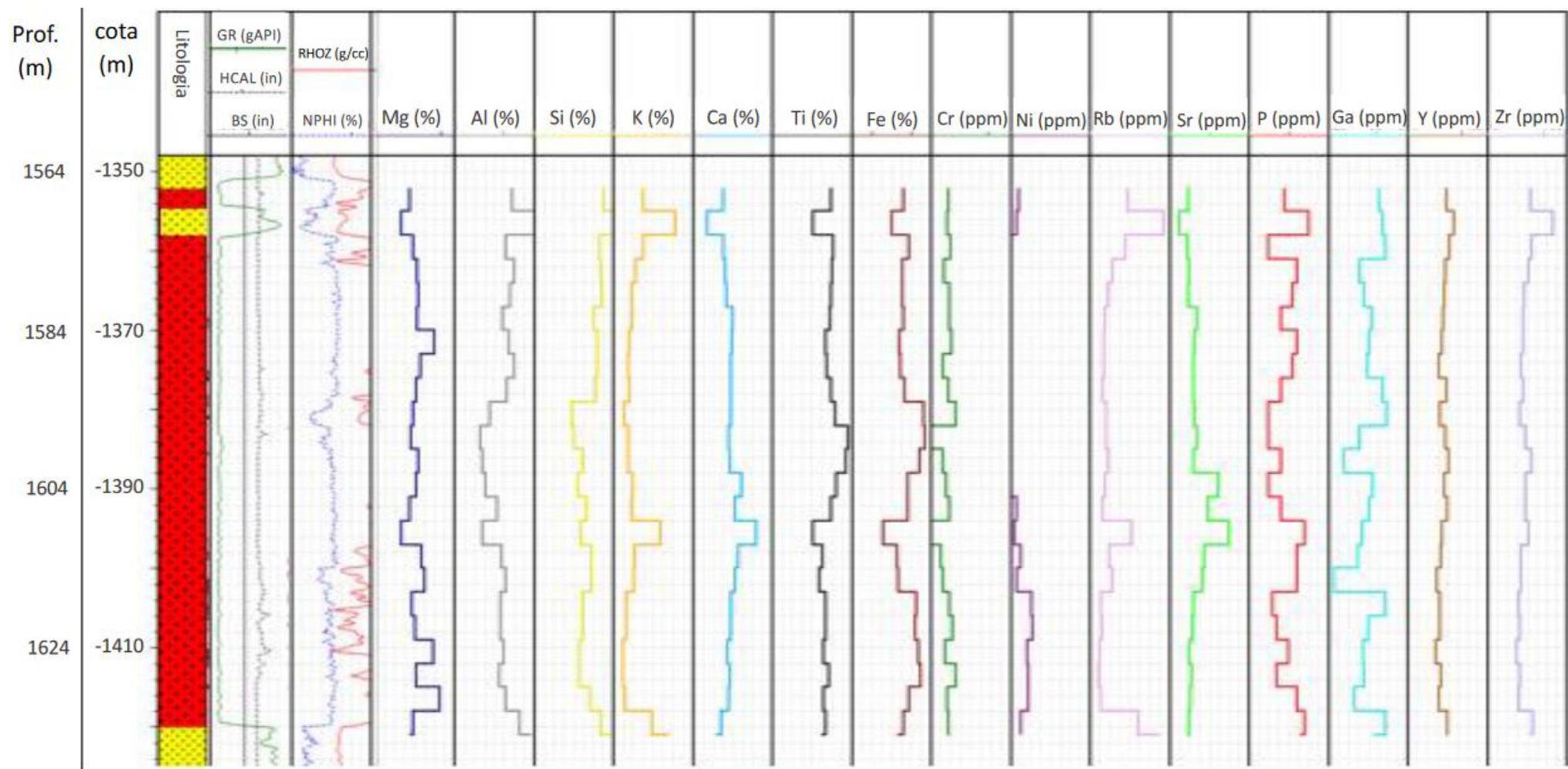
| Profundidade | Litologia | Cor     | Granulometria | Estrutura | Coesão  | Composição |         |                | Mineralogia    |
|--------------|-----------|---------|---------------|-----------|---------|------------|---------|----------------|----------------|
|              |           |         |               |           |         | Máfico     | Félsico | Máfico/Félsico |                |
| 1803 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                |                |
| 1806 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                |                |
| 1809 m       | DIA 60%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                |                |
| 1812 m       | DIA 60%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                |                |
| 1815 m       | DIA 80%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                |                |
| 1818 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                |                |
| 1821 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                |                |
| 1824 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI RAR        |
| 1827 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                | OLI TRC        |
| 1830 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                | OLI TRC        |
| 1833 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |                |
| 1836 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OXI TRC        |
| 1839 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OXI TRC        |
| 1842 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 20%        | 80%     |                |                |
| 1845 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 10%        |
| 1848 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%        |
| 1851 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%        |
| 1854 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 30%        | 70%     |                | OLI TRC        |
| 1857 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |                |
| 1860 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |                |
| 1863 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 10%        |
| 1866 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI TRC        |
| 1869 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                |                |
| 1872 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 10%        |
| 1875 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%        |
| 1878 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%        |
| 1881 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%        |
| 1884 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%        |
| 1887 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | CAL 10%        |
| 1890 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%/ CAL   |
| 1893 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | CAL 10%        |
| 1896 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI TRC/ CAL : |
| 1899 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 10%/ CAL   |
| 1902 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | CAL TRC        |
| 1905 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |                |
| 1908 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI TRC        |
| 1911 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI TRC        |
| 1914 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 40%        | 60%     |                | OLI 10%        |
| 1917 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 50%        | 50%     |                | OLI 20%        |
| 1920 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%        |
| 1923 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 10%        |
| 1926 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 80%        | 20%     |                | OLI 20%        |
| 1929 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 90%        | 10%     |                | OLI 20%        |
| 1932 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 70%        | 30%     |                | OLI 20%        |
| 1935 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 90%        | 10%     |                | OLI 20%        |
| 1938 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 20%        |
| 1941 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                | OLI 20%        |
| 1944 m       | DIA 70%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | 60%        | 40%     |                |                |
| 1947 m       | DIA 30%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/DRO | -          | -       |                |                |

## 1-OGX-93-MA (Caixote)

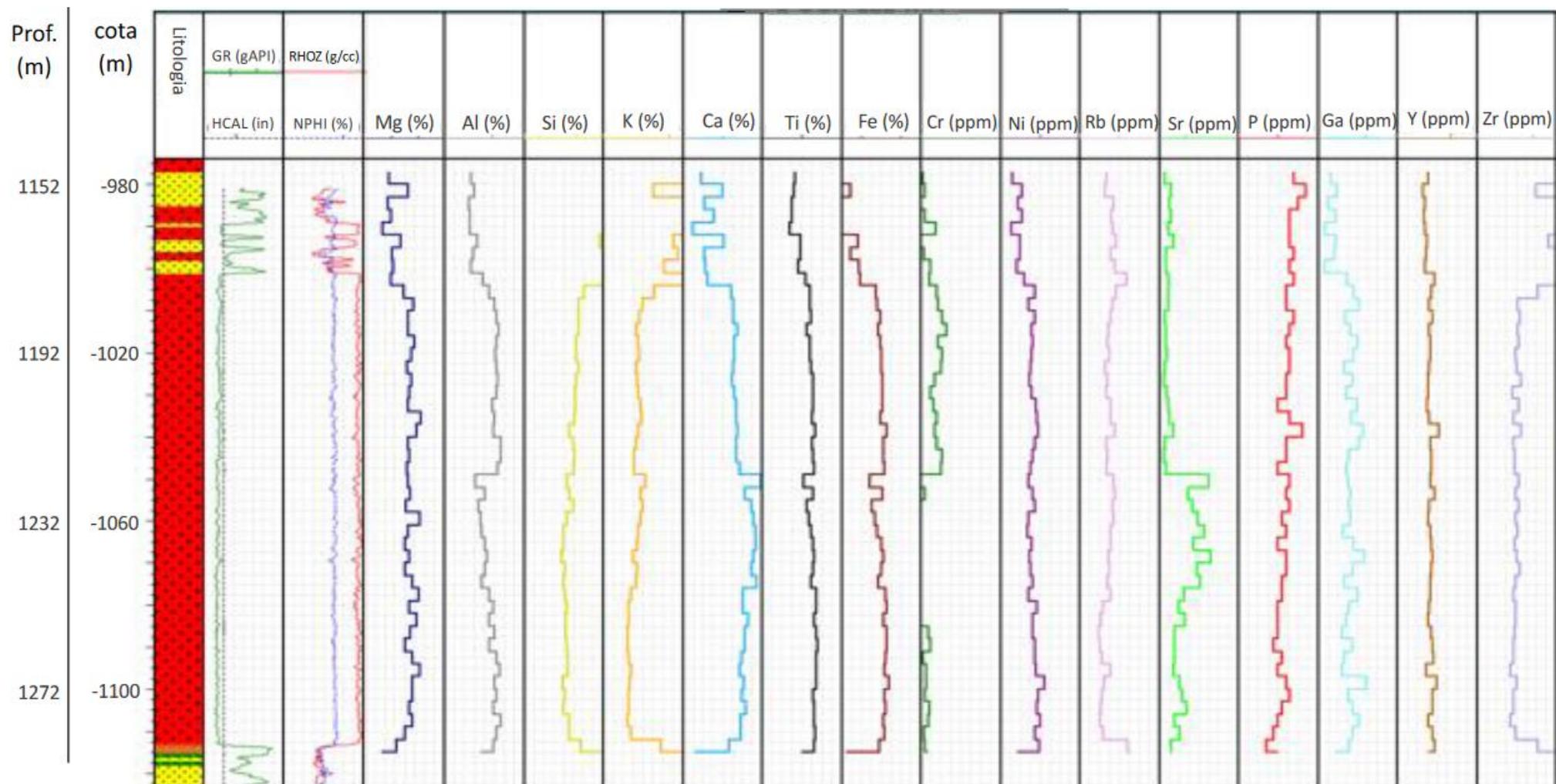
| Profundidade | Litologia | Cor     | Granulometria | Estrutura | Coesão  | Composição |         |                | Mineralogia  |
|--------------|-----------|---------|---------------|-----------|---------|------------|---------|----------------|--------------|
|              |           |         |               |           |         | Máfico     | Félsico | Máfico/Félsico |              |
| 1569 m       | DIA 50%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI TRC      |
| 1572 m       | DIA 10%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                |              |
| 1575 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI 10%      |
| 1578 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI 10%      |
| 1581 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI 10%      |
| 1584 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI 10%      |
| 1587 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI 20%      |
| 1590 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI 10%      |
| 1593 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI 10%      |
| 1596 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI 10%      |
| 1599 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI 10%      |
| 1602 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 70%        | 30%     |                | OLI 10%      |
| 1605 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                |              |
| 1608 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                |              |
| 1611 m       | DIA 10%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | FLU PERF 90% |
| 1614 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI 10%      |
| 1617 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                |              |
| 1620 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                |              |
| 1623 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 30%        | 70%     |                | OLI 10%      |
| 1626 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 60%        | 40%     |                | OLI 10%      |
| 1629 m       | DIA 100%  | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 40%        | 60%     |                | OLI TRC      |
| 1632 m       | DIA 90%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | 50%        | 50%     |                | OLI TRC      |
| 1635 m       | DIA 20%   | PRT/BCO | FAN           | MAC       | SDR/MLE | -          | -       |                |              |

## ANEXO C – Dados de Fluorescência de Raios-X

## 1-OGX-93-MA

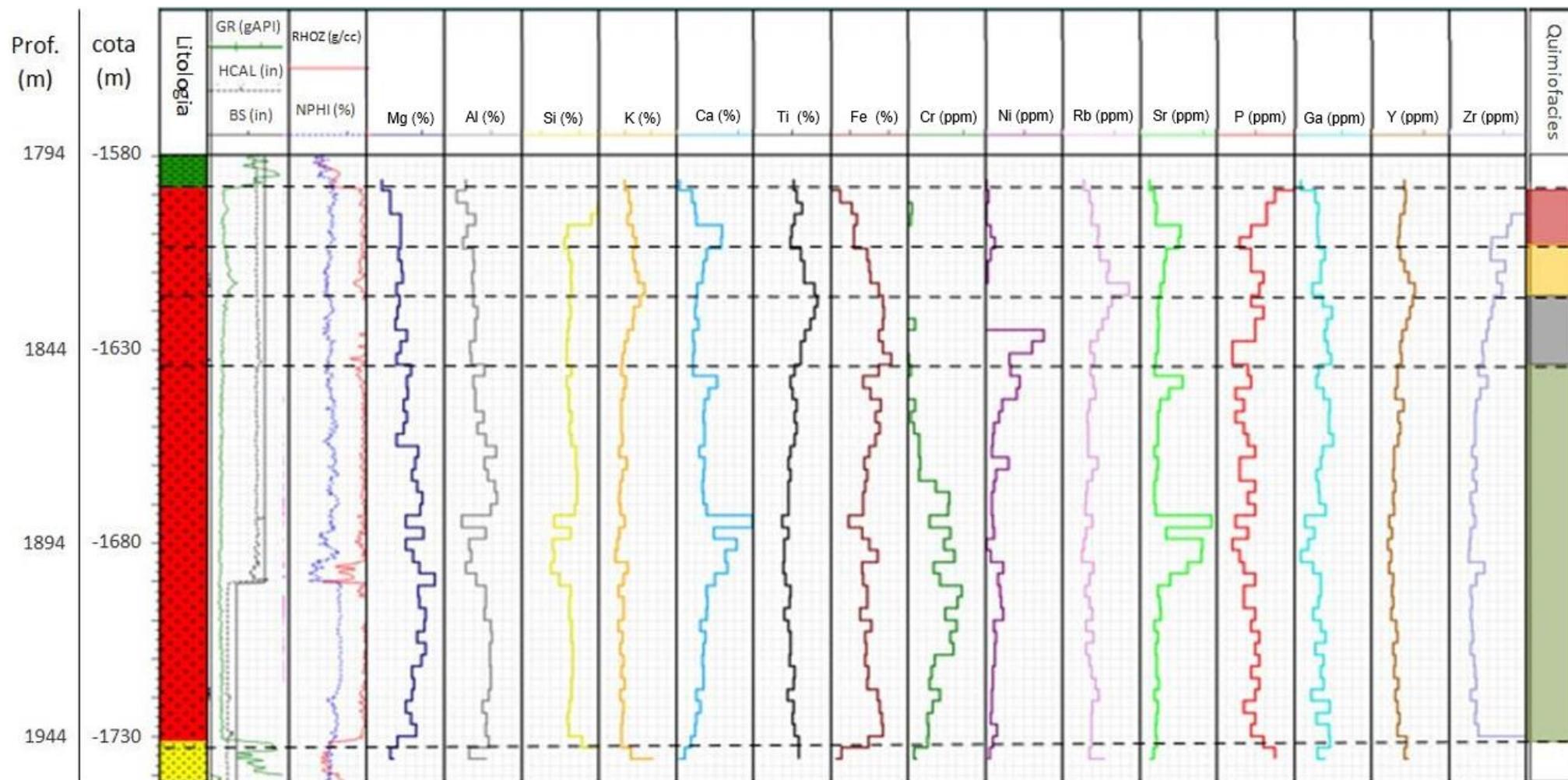


## 1-OGX-122-MA





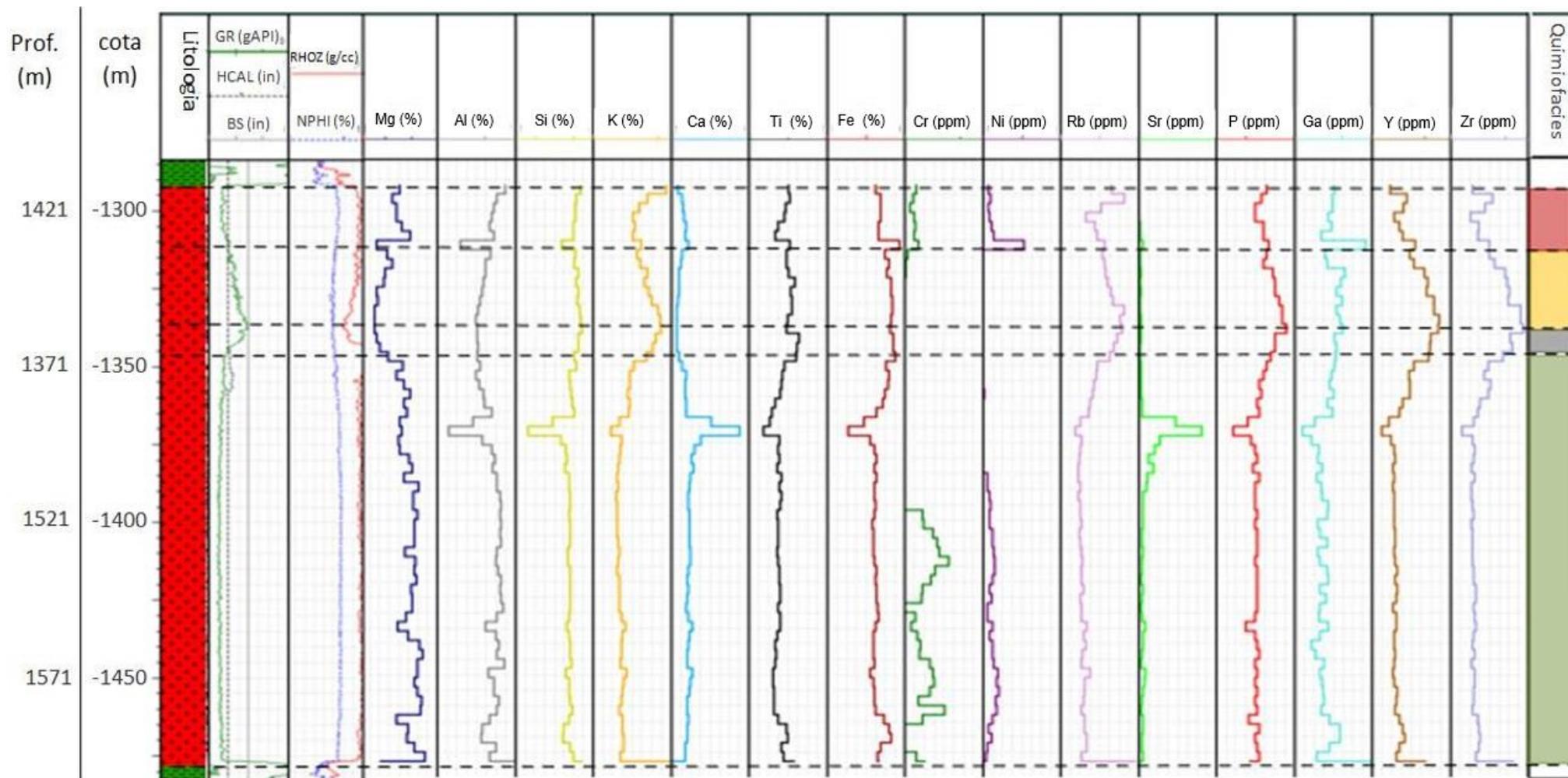
## 1-OGX-93-MA



### Legenda

- Zona rica em plagioclásio + piroxênio
- Zona rica em elementos incompatíveis
- Zona rica em Fe e Ti
- Zona rica em Mg, Cr e Ni

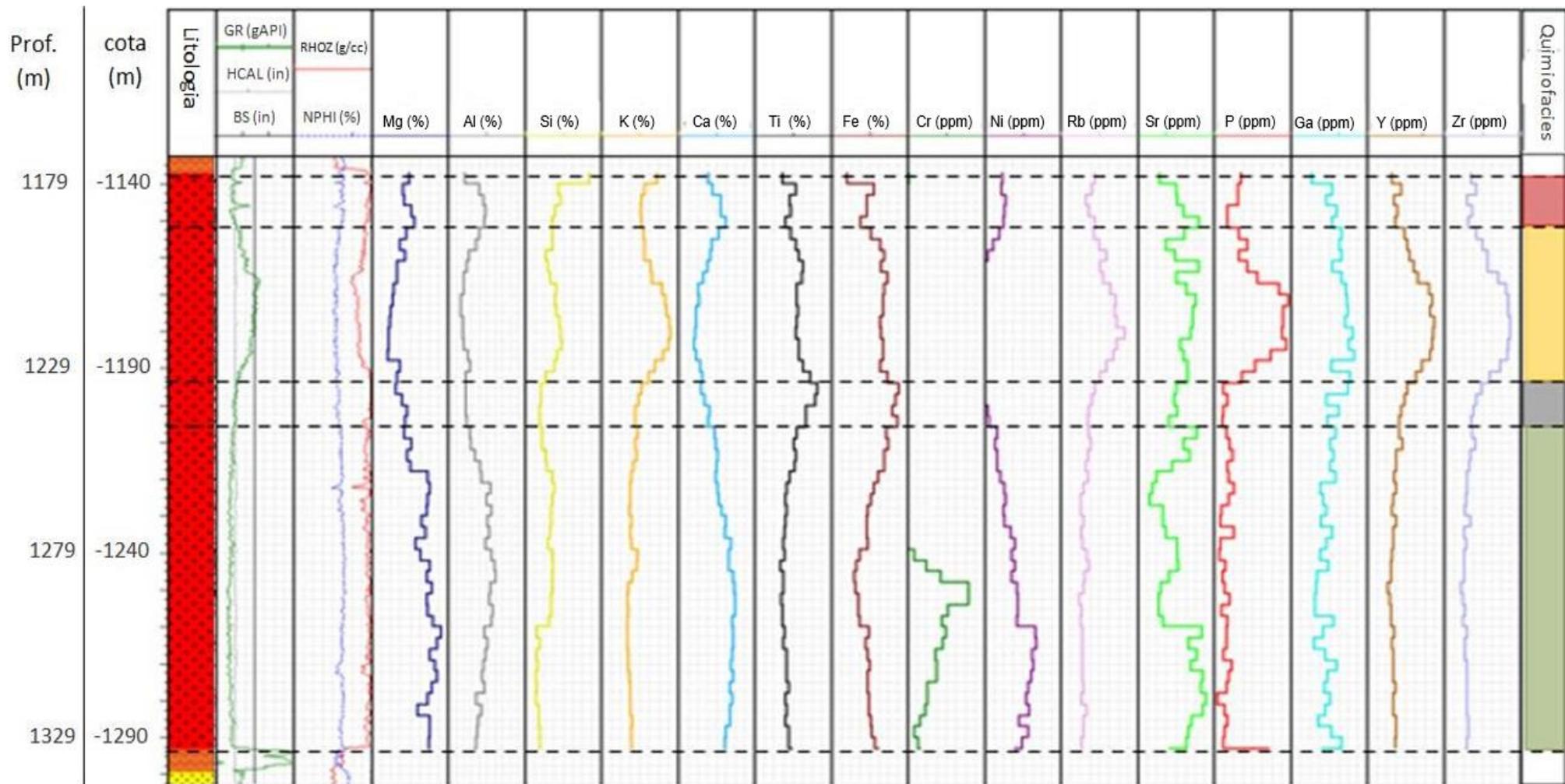
## 1-OGX-101-MA



### Legenda

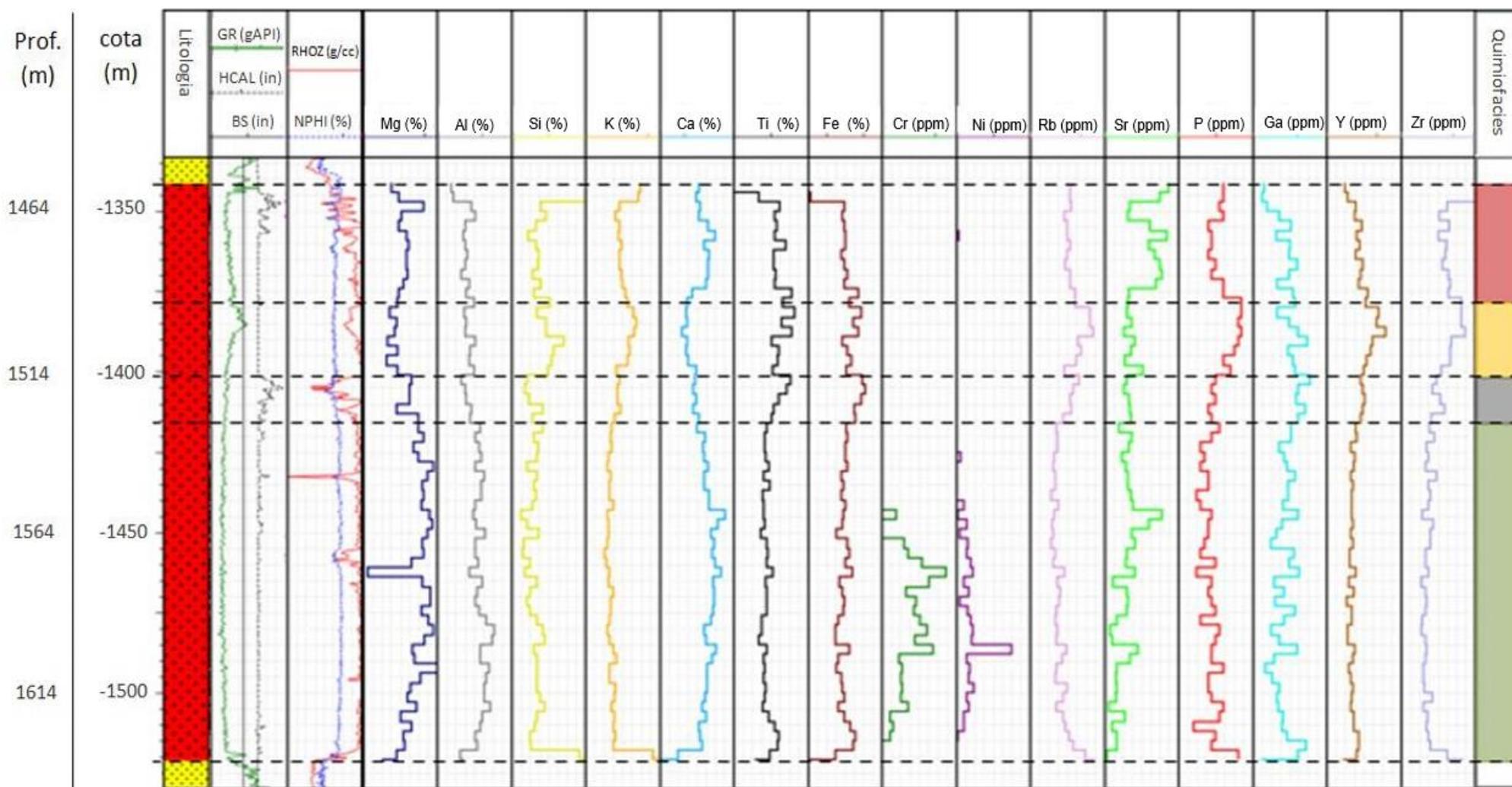
- Zona rica em plagioclásio + piroxênio
- Zona rica em elementos incompatíveis
- Zona rica em Fe e Ti
- Zona rica em Mg, Cr e Ni

## 3-PNG-5-MA


**Legenda**

- Zona rica em plagioclásio + piroxênio
- Zona rica em elementos incompatíveis
- Zona rica em Fe e Ti
- Zona rica em Mg, Cr e Ni

## 4-OGX-49-MA



### Legenda

- Zona rica em plagioclásio + piroxênio
- Zona rica em elementos incompatíveis
- Zona rica em Fe e Ti
- Zona rica em Mg, Cr e Ni

