UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FLÁVIA PEREIRA

Aquisição, Tratamento e Análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade de Dados Geoquímicos para Óxidos de Terras Raras, TiO_2 e P_2O_5 no Projeto Terras Raras do Pampa em Caçapava do Sul – RS

Caçapava do Sul - RS, 2026

FLÁVIA PEREIRA

Aquisição, Tratamento e Análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade de Dados Geoquímicos para Óxidos de Terras Raras, TiO_2 e P_2O_5 no Projeto Terras Raras do Pampa em Caçapava do Sul – RS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Coorientador: Eng. Metalúrgico Denilson da Fonseca Coutinho

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P436a Pereira, Flávia
Aquisição, Tratamento e Análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade de Dados Geoquímicos para Óxidos de Terras Raras, TiO e PO no Projeto Terras Raras do Pampa em Caçapava do Sul – RS / Flávia Pereira. 153 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2026.
"Orientação: Luis Eduardo de Souza ".

1. QA/QC. 2. Elementos Terras Raras. 3. Geoquímica de Solos. 4. Prospecção Mineral. 5. Bloco são gabriel. I. Título.

Flávia Pereira

Aquisição, Tratamento e Análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade de Dados Geoquímicos para Óxidos de Terras Raras, TiO_2 e P_2O_5 no Projeto Terras Raras do Pampa em Caçapava do Sul – RS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 13 de julho de 2026.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis
Eduardo de Souza
Orientador
Universidade Federal do Pampa

Eng. Metalúrgico Denilson da Fonseca Coutinho
Coorientador
Rad Mineração e Metalurgia

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen
Universidade Federal do Pampa

Geólogo MSc. Alexandre Magno Rocha da Rocha
Profº aposentado do Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2026, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO FONTOURA HANSEN**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2026, às 20:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2095912** e o código CRC **40945244**.

Aos meus amores Alzira, Nelzo,

Jéssica, Fabricio, Danda,

Pedro, Helena e Miguel.

E aos meus queridos avós, Neri Pereira, Pedro Kreuch e Terezinha da Silva, que iniciaram esta jornada comigo e que, hoje, permanecem vivos em minha memória e em meu coração, dedico este trabalho in memoriam.

AGRADECIMENTOS

Sonhos e propósitos são raízes necessárias pra realizações, pois são como combustíveis pra força de vontade. Até aqui, foi necessário que muitas pessoas me impulsionassem, trazendo-me confiança e a ambição necessárias para alcançar este objetivo tão lindo: buscar compreender as dinâmicas que formam o geoide que habitamos nesta breve fração de tempo chamada existência. Em meio a tudo isso, também esteve presente o medo do desconhecido, do futuro e das consequências das escolhas. Afinal, tantas vezes surge o receio: será que estou fazendo a escolha certa? E a resposta está em se lançar ao presente, apostar no que apetece à alma e no que nutre o propósito. Aos meus familiares, meu pai Nelzo, minha mãe Alzira e aos meus irmãos, Jéssica, Fabricio e Danda eu agradeço por compreenderem que esse passarinho sabe a trilha de casa, mas que gosta muito de novas rotas. O meu muito obrigada por todo o suporte, educação, amor, carinho, aconchego e puxões de orelha, vocês são tudo pra mim!

Áqueles que no início me estenderam moradia, aprendizagem e muita troca de ideia, Rennan (Baleia e Brigites), Pedro (e Buda) e Layandra, o empurrão de vocês foi crucial pra eu chegar aqui. Áqueles que coordenadas compartilhadas foram poucas perto de tantas vivências e crescimentos, meu muito obrigada a vocês, Juju, Batistelli, Luis, Rangel, Samuca, Segall, Harisson, Pacheco, Thay e Umemura. Aos amigos que estiveram presentes em diferentes fases desta jornada, meu sincero agradecimento, Ingrid, Eduardo, Ana, Hiago, Anna Clara, Jhuly, Libano, Geovana e Bruna. A minha amiga e irmã Gabriella Marioto por todo o cuidado uma com a outra junto a nossa gata. A todos os meus professores todo o meu respeito e admiração a essa profissão que faz tudo acontecer ensinando, cobrando e cuidando dessas cabeças pensantes. Vocês são água em raiz sedenta por conhecimento. Aos meus orientadores, Luis Eduardo e Denilson, agradeço pela confiança, paciência e por contribuírem diretamente neste trabalho. Agradeço em especial a todos os servidores da UNIPAMPA que zelam de tudo com muito amor, sem vocês não existiria esse ambiente. A minha família caçapavana, Lucia e Vicente. A todos os participantes do PTRP.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de reconhecer a mim mesma. Reconheço a minha coragem por permanecer positiva mesmo nos momentos difíceis, por continuar caminhando mesmo quando me sentia perdida e por buscar força nas orações, pedindo ao meu anjo da guarda que me guiasse, protegesse e governasse meus passos. Que a mudança para o bem seja constante em minha vida, que eu tenha discernimento para escolher meus caminhos, humildade para aprender com cada etapa e coragem para seguir fiel aos meus sonhos e propósitos.

Porque tu estás comigo

Salmos 23:4

Somos rios prestes a nos tornar o oceano

Khalil Gibran

Somos um ruído baixo em um oceano surdo

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aquisição, o tratamento e a qualidade dos dados geoquímicos do Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP), em Caçapava do Sul – RS, com foco nos óxidos de terras raras magnéticas (Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7), nos somatórios MREO e TREO+Y e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5. Para isso, foi realizada a organização e padronização do banco geoquímico, a conversão dos elementos para seus respectivos óxidos, o cálculo dos somatórios e a identificação dos pares original–duplicata. A avaliação de QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*, garantia e controle da qualidade) foi conduzida por meio da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo inseridas pela RAD Mineração e Metalurgia Ltda., empresa responsável pelo projeto, e duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS, laboratório responsável pelas análises químicas. Essa comparação foi realizada com base em diagramas de dispersão, coeficientes de correlação, diferença percentual relativa (RPD), análise de pares discrepantes e avaliação de *bias* por diferença versus média. Os resultados indicaram comportamento distinto entre os dois tipos de duplicata. As duplicatas laboratoriais SGS apresentaram elevada concordância com as amostras originais, com coeficientes de determinação superiores a 0,98, RPD médio inferior a 5% para todos os analitos e ausência de pares com RPD superior a 20%, indicando boa repetibilidade laboratorial. As duplicatas de campo RAD apresentaram maior variabilidade, especialmente em P_2O_5, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, MREO e TREO+Y, com discrepâncias concentradas em poucos pares original–duplicata. Ao todo, foram identificadas 36 ocorrências analito-par com RPD superior a 20%, distribuídas em oito pares de campo, com destaque para os intervalos AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; e AUGTR_0032, 6–7 m. A análise integrada indicou que as maiores diferenças estão associadas principalmente à representatividade amostral, à heterogeneidade do material de trado, à distribuição irregular de minerais acessórios e às etapas de homogeneização e quarteamento, e não à instabilidade analítica laboratorial. Conclui-se que o banco geoquímico tratado apresenta boa consistência laboratorial e é adequado para subsidiar interpretações exploratórias do PTRP. Os pares de campo com maior variabilidade foram devidamente sinalizados para apoiar na interpretação geoquímica e investigações futuras.

Palavras-chave: QA/QC; Elementos Terras Raras; Geoquímica de Solos; Prospecção Mineral; Bloco São Gabriel.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the acquisition, processing, and quality of geochemical data from the Terras Raras do Pampa Project (PTRP), in Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul State, Brazil, focusing on magnetic rare earth oxides (Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, and Tb_4O_7), the MREO and TREO+Y sums, and the associated major oxides TiO_2 and P_2O_5. To this end, the geochemical database was organized and standardized, the elements were converted into their respective oxides, the sums were calculated, and the original–duplicate pairs were identified. The QA/QC assessment (Quality Assurance/Quality Control) was conducted by comparing original samples, field duplicates inserted by RAD Mineração e Metalurgia, the company responsible for the project, and laboratory duplicates inserted by SGS, the laboratory responsible for the chemical analyses. This comparison was based on scatter plots, correlation coefficients, relative percent difference (RPD), analysis of discrepant pairs, and bias assessment using difference-versus-mean plots. The results indicated distinct behavior between the two types of duplicates. The SGS laboratory duplicates showed high agreement with the original samples, with coefficients of determination above 0.98, mean RPD below 5% for all analytes, and no pairs with RPD greater than 20%, indicating good laboratory repeatability. The RAD field duplicates showed greater variability, especially for P_2O_5, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, MREO, and TREO+Y, with discrepancies concentrated in a few original–duplicate pairs. In total, 36 analyte-pair occurrences with RPD greater than 20% were identified, distributed across eight field duplicate pairs, with emphasis on the intervals AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; and AUGTR_0032, 6–7 m. The integrated analysis indicated that the greatest differences are mainly associated with sample representativeness, the heterogeneity of auger material, the irregular distribution of accessory minerals, and the homogenization and quartering stages, rather than with laboratory analytical instability. It is concluded that the treated geochemical database shows good laboratory consistency and is suitable for supporting exploratory interpretations of the PTRP. The field duplicate pairs with greater variability were properly flagged to support geochemical interpretation and future investigations.

Keywords: QA/QC; Rare Earth Elements; Soil Geochemistry; Mineral Exploration; São Gabriel Block .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de diagrama esquemático de dispersão para avaliação de duplicatas, com comparação entre teor original e teor da duplicata, reta X = Y e envelopes auxiliares de variação de ±10% e ±20%..... 42
Figura 2- Mapa de localização da área de estudo no município de Caçapava do Sul, RS.45
Figura 3 - Mapa de distribuição do Cinturão Dom Feliciano, porção NE setor catarinense, setor central Rio Grande do Sul e setor SW setor Uruguaio. São indicados importantes zonas de cisalhamento e estruturas regionais. 47
Figura 4 - Mapa geológico local reinterpretado da área de estudo, com a distribuição dos furos de trado do Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP), Caçapava do Sul, RS. 51
Figura 5 - Integração dos dados de geofísica aérea e terrestre da área de estudo do Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP), Caçapava do Sul, RS. A) Aeroradiometria de tório (Th), com base em dados aerogeofísicos do Referencial Geologia. B) Sobreposição da aeroradiometria de tório, dos dados de cintilometria terrestre realizados pela Referencial Geologia e dos furos de trado do PTRP. 54
Figura 6 - Execução da sondagem à trado com trado motorizado Honda 160 na área de estudo do Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP) e Identificação dos furos de trado em campo.57
Figura 7 -Etapas de coleta, homogeneização e acondicionamento das amostras de trado.58
Figura 8 - Etapas de acondicionamento, identificação, organização e envio das amostras do Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP). A) Amostra individual identificada com etiqueta impermeável interna e externa e fechada com lacre plástico. B) Amostras organizadas em60
Figura 9 - Distribuição espacial dos furos com controle QA/QC sobre a geologia local do Projeto Terras Raras do Pampa. 76
Figura 10 - Distribuição espacial dos furos com controle QA/QC sobre a resposta geofísica aérea e terrestre do Projeto Terras Raras do Pampa. 77
Figura 11 - Diagrama geral de concordância original versus duplicata de campo RAD para todos os analitos avaliados, com reta X=Y e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%.85
Figura 12 - Recorte do diagrama geral RAD sem TREO+Y, MREO e Nd_2O_3, destacando os analitos de magnitude intermediária e menor. 85
Figura 13 - Ampliação do diagrama geral RAD para Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5, com reta X=Y e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%. 86
Figura 14 - Diagrama geral de concordância original versus duplicata laboratorial SGS para todos os analitos avaliados, com reta X=Y e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%.87
Figura 15 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para TREO+Y. 89
Figura 16 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para MREO. 90
Figura 17 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Nd_2O_3. 95
Figura 18 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Pr_6O_{11}. 96
Figura 19 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Dy_2O_3. 97
Figura 20 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Tb_4O_7. 98
Figura 21 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para TiO_2. 105
Figura 22 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para P_2O_5. 106
Figura 23 - Distribuição dos valores de RPD por par original–duplicata para as duplicatas laboratoriais SGS. 115

Figura 24 - Distribuição dos valores de RPD por par original–duplicata para as duplicatas de campo RAD. 116
Figura 25- Diagramas de diferença versus média para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5 nos pares originais–duplicata RAD. Cada ponto representa um par original–duplicata. O eixo X corresponde à média do par e o eixo Y à diferença entre duplicata e original. As linhas indicam a diferença zero, o *bias* médio, os limites de ±1,96 desvio padrão e a tendência linear. 123
Figura 26 - Diagramas de diferença versus média para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5 nos pares originais–duplicata SGS. Cada ponto representa um par original–duplicata. O eixo X corresponde à média do par e o eixo Y à diferença entre duplicata e original. As linhas indicam a diferença zero, o *bias* médio, os limites de ±1,96 desvio padrão e a tendência linear. 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Síntese dos teores de TiO_2 e P_2O_5 observados no banco geoquímico processado do PTRP..... 36
Tabela 2- Métodos de preparação e análise química utilizados pela SGS Geosol para as amostras do Projeto Terras Raras do Pampa. 62
Tabela 3- Tipos de controle de qualidade utilizados nos dados geoquímicos do PTRP.64
Tabela 4- Fatores de conversão dos elementos terras raras e do ítrio para seus respectivos óxidos..... 67
Tabela 5 - Principais etapas do tratamento dos dados geoquímicos..... 69
Tabela 6 - Estatística descritiva inicial das variáveis utilizadas na avaliação de QA/QC – dados RAD..... 71
Tabela 7 -Estatística descritiva inicial das variáveis utilizadas na avaliação de QA/QC – dados SGS..... 72
Tabela 8 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) por analito e tipo de duplicata. 87
Tabela 9 - Distribuição dos pares original–duplicata de TREO+Y e MREO por faixas de RPD. 91
Tabela 10 - Identificação dos pares original–duplicata de TREO+Y por faixas de RPD.92
Tabela 11 - Identificação dos pares original–duplicata de MREO por faixas de RPD. 93
Tabela 12 - Distribuição dos pares original–duplicata dos óxidos de terras raras magnéticas por faixas de RPD. 99
Tabela 13 - Identificação dos pares original–duplicata de Pr_6O_{11} por faixas de RPD. 100
Tabela 14 - Identificação dos pares original–duplicata de Nd_2O_3 por faixas de RPD. 101
Tabela 15 - Identificação dos pares original–duplicata de Dy_2O_3 por faixas de RPD. 102
Tabela 16 - Identificação dos pares original–duplicata de Tb_4O_7 por faixas de RPD. 103
Tabela 17 - Identificação dos pares original–duplicata de TiO_2 por faixas de RPD. .. 107
Tabela 18 - Identificação dos pares original–duplicata de P_2O_5 por faixas de RPD. .. 108
Tabela 19 - Síntese dos indicadores dos diagramas de dispersão por analito e tipo de duplicata. 111
Tabela 20 - Síntese dos valores de RPD por analito e tipo de duplicata. 114
Tabela 21 - Síntese dos pares original–duplicata com RPD superior a 20%..... 118
Tabela 22 - Síntese da avaliação de bias por diferença entre duplicata e original para os pares RAD e SGS..... 121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Referências centrais utilizadas no Estado da Arte. 26
Quadro 2 – Fluxograma metodológico TCC I e II – 2025/2026. 29
Quadro 3- Síntese dos principais trabalhos relacionados a ETR, carbonatitos, metacarbonatos e geoquímica na região de Caçapava do Sul e no Bloco São Gabriel. 36
Quadro 4 - Critérios adotados para avaliação dos pares original–duplicata. 80

LISTA DE SIGLAS

ETR – Elementos Terras Raras

TREO+Y – *Total Rare Earth Oxides plus Yttrium* (Total de Óxidos de Terras Raras mais Ítrio)

MREO – *Magnetic Rare Earth Oxides* (Óxidos de Terras Raras Magnéticas)

PTRP – Projeto Terras Raras do Pampa

RAD – RAD Mineração e Metalurgia

SGS - *Société Générale de Surveillance* (Sociedade Geral de Vigilância)

BSG – Bloco São Gabriel

QA/QC – *Quality Assurance/Quality Control* (Garantia da Qualidade e Controle da Qualidade)

RPD – *Relative Percent Difference* (Diferença Percentual Relativa)

CVavg - Coeficiente Médio de Variação

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Contextualização do tema 18
1.2 Problema de pesquisa 19
1.3 Justificativa 20
1.4 Estado da Arte 21
1.5 Meta ou Objetivo Geral 27
1.6 Objetivos Específicos 27
1.7 Metodologia 27
1.7.1 Fluxograma de execução 29
1.8 Organização do TCC 30
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 31
2.1 Elementos terras raras 31
2.2 Terras raras magnéticas e minerais críticos 32
2.3 Óxidos de terras raras, TREO+Y e MREO 33
2.4 Terras raras no Rio Grande do Sul e no Bloco São Gabriel 34
2.5 Óxidos maiores associados: TiO_2 e P_2O_5 36
2.6 Geoquímica aplicada à exploração mineral 38
2.7 Tratamento e organização de dados geoquímicos 39
2.8 Controle de qualidade QA/QC em dados geoquímicos 39
2.8.1 Diagramas de dispersão e avaliação de duplicatas 41
CAPÍTULO 3 ESTUDO DE CASO 45
3.1 Localização da área de estudo 45
3.2 Contexto geológico regional 46
3.3 Geologia local 50
3.4 Geofísica aérea e terrestre 53
3.5 Dados disponíveis 55
3.6 Amostragem 56
3.7 Preparação e envio das amostras 59
3.8 Metodologia de análise química 61
3.9 Controle de qualidade analítica 63
3.10 Tratamento dos dados geoquímicos 65
3.11 Análise estatística descritiva inicial 70
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO 74
4.1 Organização dos pares QA/QC 74
4.1.1 Distribuição espacial dos controles QA/QC e contexto geológico-geofísico 74

4.2 Critérios de avaliação dos pares original–duplicata 78
4.3 Avaliação gráfica dos pares original–duplicata 82
4.3.1 Diagramas gerais de concordância original versus duplicata 83
4.3.2 Diagramas de dispersão dos somatórios TREO+Y e MREO 88
4.3.3 Diagramas de dispersão dos óxidos de terras raras magnéticas 94
4.3.4 Diagramas de dispersão dos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5 104
4.3.5 Síntese dos diagramas de dispersão 109
4.4 Avaliação do RPD por analito e tipo de duplicata 112
4.4.1 Pares com RPD superior a 20% 117
4.5 Avaliação de bias por diferença versus média 120
4.6 Discussão integrada da qualidade dos dados 126
4.7 Implicações para o PTRP 131
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 134
5.1 Conclusões 134
5.2 Recomendações 136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 139
APÊNDICE A – Síntese das principais referências utilizadas no estado da arte 146
APÊNDICE B - Detalhamento dos fatores de conversão elemento–óxido 148
APÊNDICE C – Base geoquímica original recebida da SGS 149
APÊNDICE D – Base geoquímica tratada com conversão para óxidos, MREO e TREO+Y 150
APÊNDICE E - Pares original–duplicata utilizados na análise de QA/QC 151

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Os elementos terras raras (ETR) têm adquirido importância crescente no cenário mineral mundial devido à sua aplicação em tecnologias modernas, sistemas de energia limpa, eletrônica, defesa, comunicação e equipamentos de alta eficiência. Apesar da denominação “terras raras”, esses elementos não são necessariamente escassos na crosta terrestre; sua criticidade está relacionada principalmente à dificuldade de concentração econômica, separação individual e dependência de cadeias produtivas restritas (Henderson, 1984; Balaram, 2019).

Entre os ETR, destacam-se o neodímio (Nd), o praseodímio (Pr), o disprósio (Dy) e o térbio (Tb), utilizados na fabricação de ímãs permanentes de alto desempenho. Esses ímãs são essenciais para veículos elétricos, turbinas eólicas, motores industriais, equipamentos eletrônicos e outras tecnologias associadas à transição energética. Por esse motivo, as terras raras magnéticas passaram a ser consideradas estratégicas em discussões sobre minerais críticos, segurança de suprimento e desenvolvimento tecnológico (USGS, 2022; IEA, 2025).

No Brasil, o interesse por minerais críticos e estratégicos tem se intensificado em razão do potencial geológico nacional e da necessidade de ampliar o conhecimento sobre áreas favoráveis à ocorrência desses recursos. No Rio Grande do Sul, especialmente no Escudo Sul-rio-grandense e no Bloco São Gabriel, estudos anteriores indicam contextos geológicos relevantes para a investigação de ETR, incluindo metacarbonatos, rochas cálcio-silicáticas, carbonatitos, metacarbonatitos e zonas de alteração associadas (Cerva-Alves, 2017; Morales, 2017; Gomes et al., 2020; Garcia, 2023; Vieira et al., 2025).

Nesse contexto, o Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP), desenvolvido na região de Caçapava do Sul, gerou um banco de dados geoquímicos a partir da integração entre imagens aéreas, levantamentos aerogeofísicos, dados geofísicos terrestres e sondagens à trado. Essa integração permitiu direcionar melhor os trabalhos de campo em uma área da ordem de 5.000 ha, detalhada no Capítulo 3, especialmente a partir da identificação de anomalias geofísicas associadas ao tório e de respostas elevadas em cintilometria terrestre.

A campanha resultou na execução de 43 furos de sondagem à trado, com amostragens sistemáticas, análises multielementares e inserção de controles de qualidade. A utilização desses dados em interpretações exploratórias depende não apenas dos teores obtidos, mas

também da organização, rastreabilidade, padronização e confiabilidade analítica do banco geoquímico.

Assim, este trabalho está voltado à aquisição, ao tratamento e à avaliação da qualidade dos dados geoquímicos do PTRP, com foco nos óxidos de terras raras magnéticas, nos somatórios MREO e TREO+Y e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5. Os óxidos maiores foram considerados por sua relação com minerais de interesse exploratório, como fases titaníferas e fosfatadas, e também pelo interesse econômico associado a produtos minerais de titânio e fosfato.

Como referência de mercado, estudo econômico preliminar do Projeto Tiros adotou cenários de preço para concentrado fino de TiO_2 de US$390/t, US$650/t e US$910/t, enquanto o estudo de escopo do Projeto Chaketma utilizou como referência preço spot de US$300/t para rocha fosfática, em contraste com preço de longo prazo de US$150/t. Esses valores são utilizados neste trabalho apenas para contextualizar o interesse econômico desses óxidos, sem constituir avaliação econômica do PTRP (Resouro Strategic Metals, 2026; PHOSCO, 2022).

A avaliação da qualidade desses dados constitui uma etapa necessária para verificar sua consistência e seu potencial de uso em futuras interpretações geoquímicas, no reconhecimento de anomalias e no planejamento de novas etapas exploratórias.

1.2 Problema de pesquisa

Projetos de exploração mineral em fase inicial envolvem incertezas relacionadas à definição dos alvos, à representatividade das amostras, à confiabilidade das análises químicas e à continuidade das respostas geoquímicas. Em campanhas baseadas em geoquímica de solos, regolitos ou amostras de trado, a escolha correta dos pontos de investigação e o controle do fluxo de geração dos dados são etapas fundamentais para reduzir riscos interpretativos e orientar o avanço do projeto.

No PTRP, os pontos de sondagem à trado foram direcionados a partir da integração entre dados aerogeofísicos, levantamento cintilométrico terrestre e interpretação geológica. Essa estratégia permitiu concentrar a amostragem em áreas de maior interesse exploratório, associadas a anomalias geofísicas e respostas elevadas em campo. Entretanto, antes de utilizar os resultados em interpretações geoquímicas mais complexas, reconhecimento de anomalias,

planejamento de malha regular ou futuras estimativas exploratórias, é necessário verificar se o banco de dados apresenta organização, rastreabilidade e qualidade analítica adequadas.

A confiabilidade dos dados depende tanto da geração de amostras representativas quanto da consistência dos resultados obtidos em laboratório. Esse cuidado está alinhado a boas práticas internacionais de projetos minerais, como o Código JORC e o National Instrument 43-101, que destacam a importância da qualidade, rastreabilidade e verificação dos dados utilizados no reporte de resultados de exploração, recursos e reservas minerais. Esses princípios reforçam a necessidade de controle, documentação e conferência dos dados analíticos em projetos de exploração mineral (JORC, 2012; Canadian Securities Administrators, 2023).

Nesse sentido, a comparação entre amostras originais, duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais permite verificar a repetibilidade e a reprodutibilidade dos dados analíticos, distinguindo variações relacionadas à amostragem, à heterogeneidade natural do material, à preparação física e ao processo analítico. A ausência dessa avaliação pode comprometer o reconhecimento de anomalias e dificultar a definição das próximas etapas do projeto.

A questão central que orienta este estudo é: os pares originais–duplicata disponíveis no banco geoquímico do PTRP apresentam repetibilidade, reprodutibilidade e consistência suficientes para subsidiar interpretações geoquímicas, reconhecimento de anomalias e planejamento das próximas etapas exploratórias?

Dessa forma, este estudo busca avaliar se os dados geoquímicos tratados do PTRP apresentam qualidade e rastreabilidade adequadas para apoiar decisões futuras do projeto, como adensamento amostral, continuidade da investigação em áreas anômalas e eventual definição de domínios geoquímicos em etapas posteriores.

1.3 Justificativa

A investigação de elementos terras raras em áreas potenciais exige planejamento desde as etapas iniciais de campo, pois a forma como os pontos são selecionados, as amostras são coletadas, identificadas, homogeneizadas e enviadas ao laboratório pode influenciar diretamente a qualidade dos resultados analíticos. Em projetos de exploração mineral, o dado geoquímico não começa apenas no laboratório; ele depende de uma sequência de cuidados que envolve a escolha dos alvos, a execução da amostragem, o acondicionamento das amostras, o controle de duplicatas e a organização do banco de dados.

No PTRP, os pontos de sondagem à trado foram definidos em uma etapa inicial de investigação exploratória, considerando áreas com respostas geofísicas relevantes,

especialmente anomalias de tório em dados aerogeofísicos e valores elevados obtidos em levantamento cintilométrico terrestre. A partir desses indicadores, a amostragem buscou verificar a presença de teores anômalos de elementos terras raras e óxidos associados, contribuindo para avaliar o potencial geoquímico da área e orientar as próximas etapas do projeto.

Por se tratar de uma fase inicial de exploração, a confiabilidade dos dados gerados é essencial antes de avançar para interpretações mais detalhadas, definição de tendências geoquímicas, planejamento de malha regular ou futuras estimativas. Dados mal identificados, pouco rastreáveis ou com baixa reprodutibilidade podem comprometer a interpretação das anomalias e levar a decisões exploratórias equivocadas. Por isso, o controle de qualidade QA/QC deve ser considerado como parte do processo de geração do dado, e não apenas como uma etapa posterior de conferência.

A aplicação de procedimentos de QA/QC permite avaliar a precisão, a reprodutibilidade e a consistência dos resultados analíticos, reduzindo o risco de interpretações baseadas em dados inconsistentes. No caso do PTRP, essa avaliação foi realizada a partir da organização do banco geoquímico e da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo inseridas pela RAD e duplicatas laboratoriais da SGS, com foco nos óxidos de terras raras magnéticas, nos somatórios MREO e TREO+Y e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5.

Assim, este trabalho se justifica pela necessidade de organizar, tratar e avaliar a qualidade dos dados geoquímicos do PTRP antes de sua utilização em etapas exploratórias futuras. A verificação da repetibilidade e da reprodutibilidade dos dados analíticos fornece uma base técnica para avaliar a consistência do banco geoquímico e reduzir o risco de interpretações baseadas em dados pouco confiáveis.

1.4 Estado da Arte

Em estudos técnicos voltados a depósitos de terras raras, também é comum a apresentação dos resultados geoquímicos na forma de óxidos, especialmente por meio de somatórios como TREO e TREO+Y. Long et al. (2010) utilizam o TREO como parâmetro de comparação entre depósitos e projetos de terras raras, demonstrando que essa forma de apresentação permite padronizar os dados e aproximá-los da linguagem utilizada em avaliações técnicas e econômicas.

Entretanto, a utilização de métricas associadas a projetos de terras raras exige cautela, especialmente quando envolve comparações econômicas, cut-off grade, preços de cesta ou termos como REO, TREO e produtos de terras raras. Barakos e Mischo (2017) destacam que projetos de ETR apresentam características próprias e que o uso pouco claro de métricas técnicas e econômicas pode gerar interpretações equivocadas em estudos de viabilidade. Essa discussão reforça a necessidade de apresentar os dados de forma padronizada e metodologicamente transparente.

No presente trabalho, a fração relacionada aos óxidos de Nd, Pr, Dy e Tb foi tratada como MREO, em razão da importância desses elementos na produção de ímãs permanentes de alto desempenho, utilizados em veículos elétricos, turbinas eólicas e outras tecnologias estratégicas. Ressalta-se, contudo, que os somatórios TREO+Y e MREO são utilizados neste estudo como parâmetros geoquímicos e de controle de qualidade dos dados, sem constituir avaliação econômica ou estudo de viabilidade do PTRP.

Além dos depósitos primários, a literatura também aponta a importância dos solos, regolitos e perfis intempéricos na investigação de ETR. Bao e Zhao (2008) e Xu et al. (2017), por exemplo, abordam processos de enriquecimento supergênico e mineralização de terras raras em perfis de alteração desenvolvidos sobre rochas graníticas no sul da China. Embora esses contextos não sejam diretamente equivalentes ao observado na região de Caçapava do Sul, eles mostram que a geoquímica de solos e materiais superficiais constitui uma ferramenta importante em etapas iniciais de prospecção, especialmente quando integrada a dados geológicos e geofísicos.

Como exemplos internacionais, depósitos como Mountain Pass, nos Estados Unidos, Bayan Obo, Maoniuping e Dalucao, na China, e Mount Weld, na Austrália, demonstram a relevância dos carbonatitos e de seus produtos de alteração como fontes de elementos terras raras (Long et al., 2010; Verplanck; Mariano; Mariano, 2016; Verplanck et al., 2023). Esses depósitos evidenciam diferentes formas de concentração de ETR, desde mineralizações primárias associadas a carbonatitos até enriquecimentos supergênicos desenvolvidos em perfis lateríticos, como observado em Mount Weld (Verplanck et al., 2023). No Brasil, o depósito Pela Ema, da Serra Verde, em Goiás, representa um exemplo atual de produção de terras raras em argilas iônicas, com destaque para Nd, Pr, Dy e Tb, elementos diretamente relacionados à produção de ímãs permanentes (Serra Verde, 2024). Esses exemplos não estabelecem equivalência direta com o PTRP, mas reforçam a importância da investigação de materiais

intemperizados, solos, regolitos e amostras de trado em projetos exploratórios voltados a ETR (Bao; Zhao, 2008; Xu et al., 2017).

Os óxidos TiO_2 e P_2O_5 também aparecem na literatura regional e internacional como variáveis associadas à mineralogia acessória de sistemas carbonatíticos, metacarbonatíticos e alcalinos, especialmente pela presença de minerais titaníferos, apatita, monazita e pirocloro. Por isso, embora não integrem os somatórios TREO+Y e MREO, esses óxidos auxiliam na leitura litogeoquímica das amostras e na avaliação da consistência dos dados analíticos. No presente trabalho, TiO_2 e P_2O_5 foram considerados como óxidos maiores associados, em razão de sua relação com fases titaníferas e fosfatadas observadas em contextos geológicos favoráveis à ocorrência de ETR (Verplanck; Mariano; Mariano, 2016; Balaram, 2019).

No contexto brasileiro, e particularmente no Escudo Sul-rio-grandense, os estudos sobre ETR concentram-se em áreas com ocorrência de rochas carbonáticas, metacarbonatos, mármores, carbonatitos, metacarbonatitos e rochas cálcio-silicáticas. Na região de Caçapava do Sul e no Bloco São Gabriel, trabalhos como os de Neis (2013), Parisi (2018), Cerva-Alves (2017), Morales (2017), Gomes et al. (2020), Garcia (2023) e Vieira et al. (2025) contribuíram para o entendimento dos contextos geológicos e geoquímicos associados a ETR, Nb, P, Ti e minerais acessórios como apatita, monazita e pirocloro. Esses estudos fornecem a base regional para a investigação do PTRP, uma vez que demonstram a existência de contextos favoráveis à ocorrência de anomalias geoquímicas relacionadas a ETR e óxidos maiores associados.

Cerva-Alves (2017) contribuiu para o reconhecimento de carbonatitos na região de Caçapava do Sul a partir da integração entre mapeamento geológico, geoquímica de solos, aerogamaespectrometria e dados estruturais. Morales (2017) aprofundou a caracterização do Carbonatito Passo Feio, destacando aspectos mineralógicos e geoquímicos relevantes para o entendimento da ocorrência de ETR. Gomes et al. (2020) abordaram a geoquímica de solos associados aos carbonatitos de Caçapava do Sul, identificando anomalias de elementos como Ca, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Co, Th e Ce. Garcia (2023) e Vieira et al. (2025) reforçaram a importância da integração entre geologia, geofísica, geoquímica e mineralogia na investigação de ETR, Nb, P e fases minerais portadoras desses elementos na porção sul do Granito Caçapava e em áreas adjacentes.

Paralelamente aos estudos sobre ETR e contextos carbonatíticos, a literatura clássica de geoquímica aplicada à exploração mineral destaca que dados geoquímicos de solos, regolitos e amostras de trado devem ser interpretados com atenção à representatividade amostral, aos

limites de detecção, ao tratamento estatístico e à distinção entre variações naturais e inconsistências analíticas. Rose, Hawkes e Webb (1979) constituem referência clássica para a aplicação da geoquímica em exploração mineral, enquanto Reimann, Filzmoser e Garrett (2005) discutem aspectos relacionados ao tratamento estatístico de dados geoquímicos, incluindo a necessidade de cuidado na interpretação de distribuições, valores anômalos e variabilidade natural dos dados.

No campo específico da qualidade dos dados em projetos minerais, Myers (1997) aborda a gestão de erros e incertezas em processos de amostragem, destacando que a confiabilidade dos resultados depende não apenas da análise laboratorial, mas também do planejamento, da coleta, da representatividade das amostras e do controle das etapas de geração do dado. Essa abordagem é relevante para o presente trabalho porque a avaliação das duplicatas de campo e laboratoriais não se limita à identificação de diferenças numéricas, mas envolve o reconhecimento de possíveis fontes de variação associadas à amostragem, à preparação, à heterogeneidade do material e ao procedimento analítico.

Sinclair e Blackwell (2002) apresentam uma contribuição importante para a avaliação da qualidade de dados em inventário mineral, com ênfase em banco de dados, qualidade dos ensaios, procedimentos de controle analítico e avaliação de dados pareados de controle de qualidade. Os autores discutem a importância de examinar dados de duplicatas de forma gráfica e estatística, considerando a possibilidade de viés, dispersão, diferenças entre pares e comportamento dos dados ao longo da faixa de teores analisada. Essa abordagem fundamenta diretamente o uso de diagramas de dispersão, estatísticas comparativas e avaliação de pares original–duplicata neste trabalho.

Abzalov (2016), em Applied Mining Geology, reúne uma abordagem aplicada sobre controle de qualidade e garantia da qualidade em mineração, incluindo controle de acurácia, controle de precisão, uso de padrões, brancos, duplicatas, diagramas diagnósticos, análise de dados pareados e interpretação de erros associados à amostragem e à análise. O autor destaca que duplicatas podem ser utilizadas para avaliar a precisão e a reprodutibilidade dos dados, desde que os pares sejam corretamente organizados, comparados e interpretados conforme o tipo de duplicata e a etapa do processo em que foram gerados. Essa referência é central para a discussão dos resultados deste trabalho, principalmente na comparação entre duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais.

Além desses livros, trabalhos e diretrizes técnicas recentes também abordam a aplicação prática de QA/QC em programas de exploração mineral. Geboy e Engle (2011) discutem procedimentos de controle de qualidade em dados geoquímicos, incluindo o uso de amostras de controle, duplicatas, materiais de referência e checagens laboratoriais. As diretrizes do CIM (2018) reforçam a necessidade de documentação, rastreabilidade, cadeia de custódia, preparação adequada das amostras, controle analítico e verificação dos dados em programas de exploração mineral. Stanley e Lawie (2007) discutem a aplicação de medidas relativas de erro em determinações geoquímicas, oferecendo suporte para a utilização de métricas como diferença percentual relativa na avaliação de pares analíticos.

Smee et al. (2024) apresentam uma abordagem prática para QA/QC em programas de mineração, discutindo o uso de duplicatas, avaliação de precisão, gráficos de dispersão, diferença relativa e identificação de pares discrepantes. Esse tipo de abordagem é particularmente importante para o presente trabalho, pois permite avaliar se os pares originais–duplicata apresentam comportamento compatível, se há dispersão elevada em determinados intervalos de teor e se os dados possuem repetibilidade e reprodutibilidade suficientes para subsidiar interpretações geoquímicas futuras.

Quadro 1 - Referências centrais utilizadas no Estado da Arte.

Autor / ano	Foco principal	Relação com o presente trabalho
Long et al. (2010)	Depósitos de ETR e uso de TREO	Apoia a apresentação dos dados em óxidos e somatórios em PTRP.
Verplanck, Mariano e Mariano (2016)	ETR em carbonatitos	Contextualiza carbonatitos e produtos de alteração como fontes globais de ETR.
Bao e Zhao (2008); Xu et al. (2017)	ETR em perfis de alteração	Reforçam a importância de solos, regolitos e materiais intemperizados em estudos exploratórios.
Myers (1997)	Erro, incerteza e representatividade	Sustenta a discussão sobre amostragem, risco e variabilidade dos dados.
Sinclair e Blackwell (2002)	Qualidade do banco de dados e dados pareados	Fundamenta a comparação entre amostras originais e duplicatas.
Abzalov (2016)	QA/QC, duplicatas e precisão	Base principal para interpretação das duplicatas de campo e laboratoriais.

Fonte: Elaborado pela autora.

As principais referências utilizadas no Estado da Arte são sintetizadas no Quadro 1, enquanto a síntese ampliada, organizada por grupos temáticos e incluindo o foco principal e a contribuição de cada publicação para este trabalho, é apresentada no Apêndice A.

Apesar dos avanços nos estudos geológicos, mineralógicos e geoquímicos sobre ETR na região de Caçapava do Sul, ainda são limitados os trabalhos voltados especificamente à organização, tratamento e avaliação da qualidade de bancos geoquímicos gerados em campanhas exploratórias iniciais para ETR no Bloco São Gabriel. As publicações regionais fornecem a base geológica e metalogenética da área, enquanto a literatura sobre QA/QC fornece os critérios técnicos para avaliar a confiabilidade dos dados. Este trabalho se insere nessa interface, ao aplicar procedimentos de organização, tratamento e avaliação da repetibilidade e reprodutibilidade dos dados geoquímicos do PTRP, com foco nos óxidos de terras raras magnéticas, nos somatórios MREO e TREO+Y e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5.

1.5 Meta ou Objetivo Geral

Avaliar o fluxo de aquisição e tratamento, bem como a qualidade dos dados geoquímicos do PTRP, com foco nos óxidos de terras raras magnéticas, nos somatórios MREO e TREO+Y e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5, por meio da organização das amostras, do tratamento dos dados analíticos e da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais, visando verificar a repetibilidade e a reprodutibilidade dos resultados.

1.6 Objetivos Específicos

- Descrever o fluxo de aquisição dos dados geoquímicos do PTRP, desde a definição dos pontos de sondagem à trado até a coleta, identificação, preparação e envio das amostras ao laboratório;
- Organizar e tratar o banco de dados geoquímicos, preservando a rastreabilidade entre furos, intervalos amostrados, códigos de amostras, certificados analíticos e pares original–duplicata;
- Avaliar a qualidade dos dados analíticos por meio da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo inseridas pela RAD e duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS, considerando os óxidos de terras raras magnéticas, os somatórios MREO e TREO+Y e os óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5;
- Discutir a repetibilidade, a reprodutibilidade e a confiabilidade dos dados geoquímicos tratados, visando subsidiar interpretações geoquímicas e futuras etapas de exploração mineral.

1.7 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho envolveu uma sequência integrada de etapas, iniciando pela revisão bibliográfica e pelo levantamento do estado da arte sobre elementos terras raras, minerais críticos, óxidos de terras raras, somatórios TREO+Y e MREO, óxidos maiores associados, geoquímica aplicada à exploração mineral, tratamento de dados geoquímicos e controle de qualidade QA/QC. Essa etapa permitiu reunir a base teórica e técnica necessária para compreender o contexto geológico e geoquímico do PTRP, bem como os procedimentos utilizados na avaliação da qualidade dos dados analíticos.

Em seguida, foi descrito o fluxo de aquisição dos dados geoquímicos do PTRP, considerando a definição dos pontos de sondagem à trado, a execução dos furos, a coleta dos

intervalos amostrados, a identificação, homogeneização, preparação e envio das amostras ao laboratório. Essa etapa buscou preservar a relação entre a geração dos dados em campo e os resultados analíticos posteriormente utilizados no banco geoquímico.

Após o recebimento dos resultados laboratoriais, foi realizada a organização e padronização do banco de dados geoquímicos. Essa etapa incluiu a conferência dos códigos de amostras, furos, intervalos amostrados, certificados analíticos, métodos laboratoriais e pares original–duplicata. Também foram padronizadas as unidades de medida, os nomes das variáveis geoquímicas e os formatos numéricos, buscando garantir rastreabilidade e consistência ao banco de dados tratado.

Os elementos terras raras selecionados foram convertidos para seus respectivos óxidos por meio de fatores estequiométricos. A partir desses dados, foram calculados os somatórios TREO+Y e MREO, sendo este último definido pela soma dos óxidos Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7. Também foram selecionados os óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5, utilizados como variáveis complementares em razão de sua relação com fases titaníferas e fosfatadas presentes em contextos geológicos favoráveis à ocorrência de ETR.

A avaliação da qualidade dos dados analíticos foi realizada por meio da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo inseridas pela RAD e duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS. Para cada variável selecionada, foram organizados os pares originais–duplicata e elaborados diagramas de dispersão, com a reta X=Y de referência e faixas auxiliares de variação de ±5%, ±10% e ±20%. Também foram avaliados a diferença percentual relativa (RPD), a correlação entre os pares, a dispersão dos dados em relação à reta X=Y e possíveis tendências de afastamento entre amostras originais e duplicatas.

Por fim, os resultados foram interpretados considerando a distinção entre duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais. As duplicatas de campo foram analisadas como indicadoras da variabilidade associada à coleta, homogeneização, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado. As duplicatas laboratoriais foram avaliadas como indicadoras da repetibilidade e reprodutibilidade associadas principalmente à preparação e análise em laboratório. Com isso, buscou-se discutir a confiabilidade do banco geoquímico tratado e seu potencial de uso em futuras etapas de interpretação geoquímica e exploração mineral.

1.7.1 Fluxograma de execução

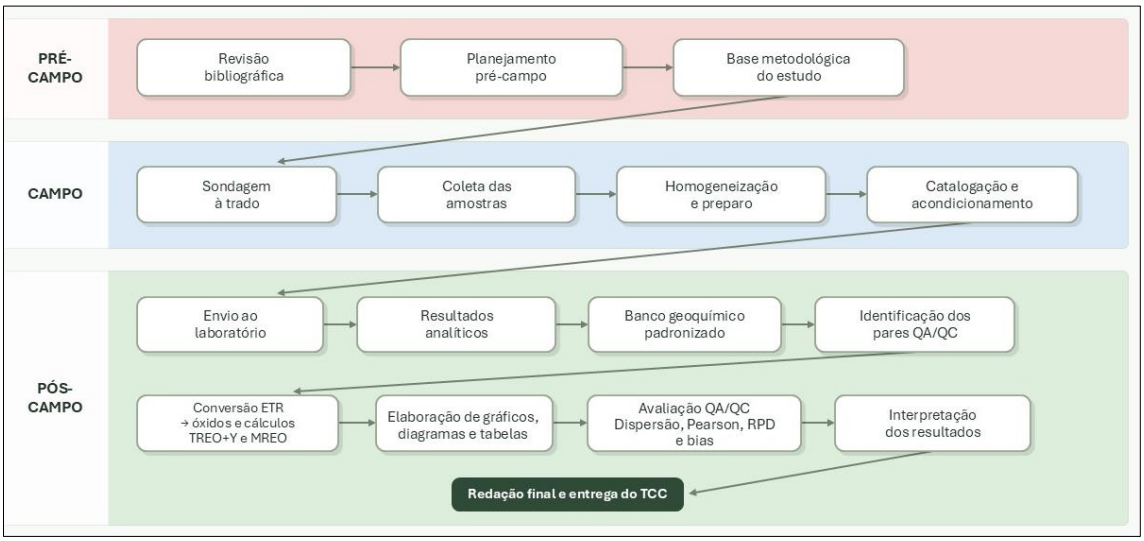
O desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso foi estruturado em três etapas principais: pré-campo, campo e pós-campo. A etapa de pré-campo compreendeu a revisão bibliográfica, o planejamento das atividades e a definição da base metodológica do estudo. A etapa de campo envolveu a execução da sondagem à trado, a coleta das amostras e os procedimentos de homogeneização, preparo, catalogação e acondicionamento.

A etapa de pós-campo iniciou-se com o envio das amostras ao laboratório e o recebimento dos resultados analíticos. Em seguida, realizou-se a organização e padronização do banco geoquímico, incluindo a identificação dos pares original–duplicata utilizados na avaliação de QA/QC. Posteriormente, os elementos terras raras foram convertidos em seus respectivos óxidos, permitindo o cálculo dos somatórios TREO+Y e MREO.

Na sequência, foram elaborados gráficos, diagramas e tabelas para a avaliação dos dados. A qualidade dos resultados foi analisada por meio de diagramas de dispersão, correlação de Pearson, Diferença Percentual Relativa (RPD) e análise de bias. Por fim, os resultados foram interpretados de forma integrada e utilizados na redação final e na conclusão do trabalho.

O fluxograma apresentado no Quadro 2 sintetiza a sequência metodológica adotada ao longo do TCC I e do TCC II, permitindo visualizar as etapas de aquisição, tratamento, avaliação de QA/QC e interpretação dos dados geoquímicos.

Quadro 2 – Fluxograma metodológico TCC I e II – 2025/2026.



Fonte: Elaborado pela autora.

1.8 Organização do TCC

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, incluindo a contextualização do tema, o problema de pesquisa, a justificativa, o estado da arte, os objetivos e a metodologia geral adotada.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica, abordando os elementos terras raras, as terras raras magnéticas, os óxidos de terras raras, os somatórios MREO e TREO+Y, os óxidos maiores associados, a geoquímica aplicada à exploração mineral, o tratamento de dados geoquímicos e os fundamentos de controle de qualidade QA/QC.

O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso do PTRP, incluindo a localização da área de estudo, o contexto geológico regional e local, os dados geofísicos disponíveis, os furos de trado, as amostras utilizadas, os procedimentos de amostragem, preparação, análise laboratorial e organização do banco de dados.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados da avaliação da qualidade dos dados analíticos, com foco na comparação entre amostras originais, duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais, por meio de diagramas de dispersão, diferença percentual relativa, correlação e análise de repetibilidade e reprodutibilidade.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho, destacando os principais resultados obtidos, as limitações da avaliação realizada e as possibilidades de uso do banco geoquímico tratado em futuras etapas de exploração mineral.

O Capítulo 6 reúne as referências bibliográficas utilizadas ao longo do estudo. Ao final do trabalho, são apresentados os apêndices, incluindo a síntese ampliada das principais referências utilizadas no Estado da Arte.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Elementos terras raras

Os elementos terras raras (ETR) correspondem a um grupo de elementos químicos formado pelos lantanídeos, do lantânio (La) ao lutécio (Lu), aos quais geralmente são associados o ítrio (Y) e, em alguns casos, o escândio (Sc), devido às semelhanças de comportamento geoquímico e ocorrência mineral. Segundo Henderson (1984), esses elementos apresentam propriedades químicas muito semelhantes entre si, o que explica sua ocorrência conjunta em diversos minerais e a dificuldade histórica de separação individual. Apesar do nome "terras raras", esses elementos não são necessariamente raros na crosta terrestre; a denominação está mais relacionada à dificuldade de separação, isolamento e concentração econômica do que à sua abundância absoluta (Henderson, 1984; Balaram, 2019).

Historicamente, a descoberta dos ETR está relacionada ao mineral encontrado na região de Ytterby, na Suécia, no final do século XVIII. A partir da análise desse material, Johan Gadolin identificou uma nova "terra", posteriormente associada ao ítrio, dando início ao reconhecimento progressivo desse grupo de elementos. A expressão "terras raras" surgiu porque esses elementos foram inicialmente isolados na forma de óxidos, então chamados de "terras", e por ocorrerem em minerais considerados pouco comuns à época (Henderson, 1984; Klinger, 2015).

Do ponto de vista geoquímico, os ETR são encontrados principalmente em minerais acessórios e fases minerais específicas, como monazita, bastnasita, xenotima, allanita, apatita e titanita. De acordo com Balaram (2019), esses elementos são amplamente utilizados em estudos de ocorrência, exploração e avaliação geoquímica, pois suas concentrações podem refletir processos magmáticos, metamórficos, hidrotermais e intempéricos. Em áreas com solo, regolito ou perfis de alteração, os ETR podem sofrer concentração residual ou redistribuição, tornando-se relevantes para campanhas de prospecção geoquímica.

Na exploração mineral, os ETR são avaliados tanto por seus teores individuais quanto por somatórios expressos na forma de óxidos, como TREO, do inglês Total Rare Earth Oxides, e TREO+Y, que inclui também o óxido de ítrio. Long et al. (2010) utilizam o TREO como parâmetro para apresentar e comparar teores e recursos em depósitos de terras raras, demonstrando que essa forma de expressão é comum em avaliações técnicas e econômicas. Por isso, a conversão dos elementos para óxidos permite padronizar os dados e aproximá-los da forma usualmente empregada em projetos de terras raras (Long et al., 2010; USGS, 2025).

As terras raras podem ser classificadas, de forma geral, em terras raras leves e terras raras pesadas. As terras raras leves incluem La, Ce, Pr, Nd, Sm e Eu, enquanto as terras raras pesadas compreendem Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu, além do Y, frequentemente associado a esse grupo por apresentar comportamento geoquímico semelhante. Essa divisão é importante porque os ETR leves e pesados podem apresentar diferentes comportamentos geoquímicos, minerais hospedeiros, respostas ao intemperismo e valores econômicos distintos (Henderson, 1984; Long et al., 2010; Balaram, 2019).

No contexto deste trabalho, os ETR são avaliados a partir dos dados geoquímicos do PTRP, com foco nos elementos que compõem os óxidos de terras raras magnéticas, especialmente Pr, Nd, Dy e Tb, além dos somatórios MREO e TREO+Y.

2.2 Terras raras magnéticas e minerais críticos

As terras raras passaram a ocupar posição de destaque nas discussões sobre minerais críticos e estratégicos devido à sua importância para tecnologias modernas, transição energética, eletrônica, defesa e sistemas de alta eficiência. O conceito de mineral crítico não está relacionado apenas à raridade geológica de um elemento, mas à combinação entre importância econômica, risco de suprimento, dificuldade de substituição e concentração das cadeias produtivas (USGS, 2022; IEA, 2025).

No contexto da transição energética, a Organização das Nações Unidas destaca que minerais como cobre, lítio, níquel, cobalto e elementos terras raras são componentes essenciais para tecnologias limpas em expansão, como turbinas eólicas, painéis solares, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia (United Nations, 2024). Assim, os ETR não são relevantes apenas para a mineração, mas também para a redução de emissões de carbono, segurança energética e desenvolvimento tecnológico.

Entre os ETR, destacam-se o neodímio (Nd), o praseodímio (Pr), o disprósio (Dy) e o térbio (Tb), empregados na produção de ímãs permanentes de alto desempenho. Segundo a Agência Internacional de Energia, a demanda por terras raras magnéticas está diretamente relacionada ao crescimento do uso de ímãs permanentes em veículos elétricos, turbinas eólicas, motores industriais e outras tecnologias de alta eficiência (IEA, 2025). Esses elementos são estratégicos porque contribuem para a eficiência, miniaturização e desempenho de motores elétricos e geradores.

A criticidade das terras raras também é reconhecida em listas oficiais internacionais. A União Europeia inclui terras raras leves e pesadas em sua lista de matérias-primas críticas, considerando sua importância econômica e o risco de suprimento associado a esses elementos (European Commission, 2023). De modo semelhante, o Serviço Geológico dos Estados Unidos inclui diversos ETR na lista oficial de minerais críticos, entre eles La, Ce, Pr, Nd, Sm, Dy, Tb, Y e outros elementos do grupo (USGS, 2022).

No Brasil, a discussão sobre minerais críticos e estratégicos também tem ganhado destaque em razão do potencial geológico nacional e da necessidade de ampliar a participação do país nas cadeias produtivas associadas à transição energética. A Agência Nacional de Mineração destaca que lítio, níquel, cobalto, manganês, grafita, cobre e terras raras são insumos essenciais para baterias, turbinas eólicas, painéis solares e redes elétricas, tornando a transição energética diretamente relacionada à agenda mineral brasileira (ANM, 2026). O Ministério de Minas e Energia também aponta o potencial do Brasil em minerais estratégicos, incluindo terras raras, reforçando a importância de estudos voltados à identificação, caracterização e avaliação de áreas potenciais (MME, 2026).

A investigação de áreas com potencial para ocorrência de ETR, associada à aquisição, organização, tratamento e avaliação da qualidade dos dados geoquímicos, constitui uma etapa importante para subsidiar fases posteriores de exploração mineral. No caso do PTRP, a avaliação dos óxidos de terras raras magnéticas, dos somatórios MREO e TREO+Y, dos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5 e da repetibilidade e reprodutibilidade dos dados analíticos insere-se nesse contexto de crescente interesse por minerais críticos e estratégicos.

2.3 Óxidos de terras raras, TREO+Y e MREO

Em projetos de exploração mineral voltados a elementos terras raras, os resultados geoquímicos podem ser apresentados na forma elementar, geralmente em ppm, ou convertidos para seus respectivos óxidos, também expressos em ppm ou em porcentagem, conforme a finalidade da análise. A apresentação em óxidos é comum em estudos técnicos e relatórios de depósitos de terras raras, pois facilita a comparação entre diferentes projetos e aproxima os dados da forma usualmente utilizada na avaliação econômica desses elementos (Long et al., 2010; USGS, 2025).

A conversão dos elementos terras raras para óxidos é realizada por meio de fatores estequiométricos, calculados a partir da relação entre a massa molar do óxido e a massa do elemento presente nesse óxido. Dessa forma, elementos como Pr, Nd, Dy, Tb e Y podem ser expressos, respectivamente, como Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7 e Y_2O_3. Essa padronização permite o cálculo de somatórios importantes, como TREO+Y e MREO.

O TREO, do inglês Total Rare Earth Oxides, corresponde ao somatório dos óxidos de terras raras presentes em uma amostra. Quando o ítrio é incluído nesse cálculo, utiliza-se o termo TREO+Y, uma vez que o Y apresenta comportamento geoquímico semelhante ao das terras raras pesadas e frequentemente ocorre associado a esse grupo (Henderson, 1984; Long et al., 2010). O MREO, do inglês Magnetic Rare Earth Oxides, representa o somatório dos óxidos de terras raras magnéticas. Neste trabalho, o MREO foi definido como a soma de Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7, elementos associados à produção de ímãs permanentes de alto desempenho, utilizados em veículos elétricos, turbinas eólicas e tecnologias de alta eficiência (IEA, 2025).

Assim, enquanto o TREO+Y expressa o conteúdo total de óxidos de terras raras mais ítrio, o MREO destaca a fração de maior interesse tecnológico e exploratório. No PTRP, esses dois somatórios foram utilizados juntamente com os óxidos individuais Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7 na avaliação da qualidade dos dados geoquímicos tratados.

A avaliação separada dos óxidos individuais e dos somatórios permite distinguir o comportamento de cada elemento da resposta integrada do conjunto. A comparação dos pares original–duplicata para Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7 permite avaliar a repetibilidade e a reprodutibilidade de cada óxido individualmente, enquanto o MREO representa a resposta conjunta das terras raras magnéticas.

2.4 Terras raras no Rio Grande do Sul e no Bloco São Gabriel

No Rio Grande do Sul, os estudos relacionados a elementos terras raras concentram-se principalmente no contexto do Escudo Sul-rio-grandense, especialmente no Bloco São Gabriel e na região de Caçapava do Sul. Essa região apresenta diversidade litológica importante, com ocorrência de rochas metamórficas, metacarbonatos, mármores, unidades máficas, granitos, carbonatitos e metacarbonatitos, constituindo um contexto favorável para investigações geoquímicas voltadas à compreensão do comportamento dos ETR e de óxidos associados.

Os trabalhos regionais indicam dois contextos principais de interesse. O primeiro corresponde aos mármores e metacarbonatos do Bloco São Gabriel, relacionados a sequências metassedimentares carbonáticas. Nesse contexto, Parisi (2018) discutiu a assinatura geoquímica de mármores calcíticos e dolomíticos, enquanto Neis (2013) contribuiu para a caracterização geoquímica de metacarbonatos nas regiões de Caçapava do Sul e Arroio Grande. Esses estudos são importantes porque ajudam a compreender a variabilidade geoquímica natural das rochas carbonáticas regionais.

O segundo contexto corresponde aos carbonatitos e metacarbonatitos de Caçapava do Sul, como Passo Feio e Picada dos Tocos. Cerva-Alves (2017) demonstrou que a integração entre geoquímica de solos, aerogamaespectrometria, mapeamento geológico, dados estruturais e sondagem contribuiu para o reconhecimento desses corpos. Morales (2017), por sua vez, detalhou o Carbonatito Passo Feio, identificando minerais como apatita, monazita-(Ce) e aeschynita-(Ce), além de enriquecimento em ETR nos solos associados.

Estudos mais recentes reforçam o interesse exploratório da região. Gomes et al. (2020) identificaram anomalias geoquímicas de Ca, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Co, Th e Ce em solos adjacentes aos carbonatitos de Caçapava do Sul. Garcia (2023) destacou a importância da integração entre geofísica, mapeamento geológico e química mineral na prospecção de rochas carbonatíticas e fases minerais associadas a ETR, Nb e P ao sul do Granito Caçapava. Vieira et al. (2025) também identificaram apatita, monazita e pirocloro como fases minerais relevantes no Metacarbonatito Passo Feio, reforçando o potencial da área para ocorrência de ETR e elementos associados.

Dessa forma, os estudos desenvolvidos no Escudo Sul-rio-grandense, especialmente no Bloco São Gabriel e na região de Caçapava do Sul, demonstram a existência de contextos geológicos favoráveis à investigação de ETR e óxidos associados. A ocorrência de metacarbonatos, mármores, carbonatitos, metacarbonatitos, minerais fosfatados e minerais titaníferos fornece base para a avaliação geoquímica do PTRP, especialmente considerando os óxidos de terras raras, os somatórios MREO e TREO+Y e os óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5.

Quadro 3- Síntese dos principais trabalhos relacionados a ETR, carbonatitos, metacarbonatos e geoquímica na região de Caçapava do Sul e no Bloco São Gabriel.

Referência	Escala/tema	Contribuição para este trabalho
Neis (2013)	Metacarbonatos do Escudo Sul-rio-grandense	Caracteriza metacarbonatos em Caçapava do Sul e Arroio Grande, contribuindo para o entendimento da variabilidade geoquímica das rochas carbonáticas regionais.
Parisi (2018)	Mármores do Bloco São Gabriel	Discute ETR em mármores calcíticos e dolomíticos, com anomalias de Ce e Eu associadas à origem marinha e possível influência hidrotermal.
Cerva-Alves (2017)	Carbonatitos de Caçapava do Sul	Integra geoquímica de solo, aerogamaespectrometria, mapeamento, estruturas e sondagem na identificação dos carbonatitos Passo Feio e Picada dos Tocos.
Morales (2017)	Carbonatito Passo Feio	Descreve minerais como apatita, monazita-(Ce) e aeschynita-(Ce), além de enriquecimento em ETR nos solos associados ao carbonatito.
Gomes et al. (2020)	Solos adjacentes a carbonatitos	Registra anomalias de Ca, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Co, Th e Ce associadas aos carbonatitos de Caçapava do Sul.
Garcia (2023)	Prospecção ao sul do Granito Caçapava	Relaciona geofísica, mapeamento e química mineral na prospecção de rochas carbonatíticas, com destaque para ETR, Nb, P e possíveis zonas de alteração fenítica.
Vieira et al. (2025)	Metacarbonatito Passo Feio	Identifica apatita, monazita e pirocloro como fases minerais relevantes para ETR, destacando enriquecimento em ETR leves e potencial exploratório.

Fonte: Elaborado pela autora.

2.5 Óxidos maiores associados: TiO_2 e P_2O_5

Além dos óxidos de terras raras, este trabalho considerou TiO_2 e P_2O_5 como variáveis litogeoquímicas complementares, em razão dos teores destacados observados no banco geoquímico processado do PTRP e de sua relação com minerais acessórios associados a contextos carbonatíticos, metacarbonatíticos e alcalinos. Esses óxidos não integram os somatórios MREO ou TREO+Y, mas foram mantidos na avaliação por estarem relacionados a minerais titaníferos e fases fosfatadas que podem concentrar ou hospedar elementos terras raras.

Tabela 1- Síntese dos teores de TiO_2 e P_2O_5 observados no banco geoquímico processado do PTRP.

Variável (%)	Nº de amostras	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Percentil 90
TiO_2	303	1,37	12,83	5,40	5,09	7,80
P_2O_5	303	0,16	12,56	1,61	1,28	2,83

Fonte: Elaborado pela autora com base no banco geoquímico processado do PTRP.

Na Tabela 1, o percentil 90 foi utilizado para representar o limite superior da distribuição dos dados, indicando o valor abaixo do qual se encontram 90% das amostras. Dessa forma, esse

parâmetro auxilia na identificação da faixa dos 10% valores mais elevados, sem depender exclusivamente do valor máximo, que pode representar uma ocorrência pontual.

Os valores sintetizados na Tabela 1 não devem ser interpretados isoladamente como indicativos de viabilidade econômica ou como teores de minério. Entretanto, quando avaliados no contexto de uma campanha geoquímica preliminar com amostras de trado, os teores máximos observados para TiO_2 e P_2O_5 representam respostas expressivas e justificam sua utilização como variáveis complementares na análise. Esses valores podem indicar a contribuição de minerais titaníferos e fosfatados, especialmente quando considerados em conjunto com o contexto geológico regional e com a ocorrência de rochas carbonáticas, carbonatíticas e metacarbonatíticas.

O TiO_2 está relacionado principalmente à presença de minerais titaníferos, como ilmenita, rutilo e titanita. Em contextos carbonatíticos e alcalinos, esses minerais podem ocorrer como fases acessórias e contribuir para a assinatura geoquímica das rochas e dos materiais de alteração. No contexto regional, Cerva-Alves (2017) descreveu minerais titaníferos nos carbonatitos Passo Feio e Picada dos Tocos, enquanto Gomes et al. (2020) registraram anomalias de Ti em solos adjacentes aos carbonatitos de Caçapava do Sul. No banco geoquímico do PTRP, o TiO_2 foi mantido como variável complementar por sua relação com minerais titaníferos e por auxiliar na leitura litogeoquímica das amostras.

O P_2O_5, por sua vez, está relacionado principalmente a minerais fosfatados, como apatita e monazita. A apatita é comum em sistemas carbonatíticos e pode registrar variações de P e ETR, enquanto a monazita constitui um dos principais minerais portadores de terras raras leves. Morales (2017) identificou apatita, monazita-(Ce) e aeschynita-(Ce) no Carbonatito Passo Feio. Vieira et al. (2025) reforçaram essa relação ao identificar apatita, monazita e pirocloro como fases minerais relevantes para ETR no Metacarbonatito Passo Feio. Garcia (2023) também registrou minerais fosfatados e minerais contendo ETR e Nb em rochas investigadas ao sul do Granito Caçapava.

Dessa forma, TiO_2 e P_2O_5 foram utilizados como apoio à interpretação litogeoquímica das amostras e à avaliação da consistência dos dados analíticos. Embora não representem diretamente óxidos de terras raras, esses óxidos maiores associados constituem indícios geoquímicos relevantes para a continuidade da investigação da área, pois podem estar relacionados a minerais acessórios de interesse em sistemas carbonatíticos, metacarbonatíticos e alcalinos. Assim, sua inclusão permite comparar a repetibilidade e a reprodutibilidade de

componentes associados ao contexto mineralógico local, juntamente com os óxidos de terras raras avaliados neste trabalho.

2.6 Geoquímica aplicada à exploração mineral

A geoquímica aplicada à exploração mineral é utilizada para reconhecer variações na distribuição dos elementos químicos em rochas, solos, sedimentos e materiais de alteração. Essas variações podem indicar mudanças litológicas, processos de alteração, dispersão geoquímica ou possíveis concentrações associadas a mineralizações, sendo uma ferramenta importante nas fases iniciais de investigação exploratória (Rose; Hawkes; Webb, 1979).

Em áreas com cobertura de solo ou regolito, a amostragem geoquímica permite avaliar a resposta química dos materiais superficiais e subsuperficiais. A amostragem por trado é útil nesse contexto porque possibilita acessar intervalos abaixo da superfície imediata, reduzindo a influência de matéria orgânica, retrabalhamento recente ou contaminações locais. Em Caçapava do Sul, trabalhos como Morales (2017), Gomes *et al*. (2020) e Garcia (2023) demonstram a importância da geoquímica de solos e materiais alterados na investigação de carbonatitos, ETR e elementos associados.

A interpretação dos dados geoquímicos depende da distinção entre valores de background e valores anômalos. O background representa a variação natural esperada para determinado elemento em um contexto geológico específico, enquanto a anomalia corresponde a valores que se destacam em relação a esse padrão. Essa avaliação deve considerar a litologia, o intemperismo, a mobilidade dos elementos e os processos de dispersão no ambiente superficial (Reimann; Filzmoser; Garrett, 2005).

No contexto deste trabalho, a geoquímica aplicada à exploração mineral fornece a base para interpretar os resultados analíticos do PTRP e reconhecer possíveis respostas anômalas associadas aos óxidos de terras raras, aos somatórios MREO e TREO+Y e aos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5. Entretanto, antes de utilizar esses dados em interpretações exploratórias mais avançadas, é necessário avaliar sua organização, rastreabilidade e consistência analítica por meio da comparação entre amostras originais e duplicatas.

2.7 Tratamento e organização de dados geoquímicos

O tratamento de dados geoquímicos corresponde à etapa de conferência, padronização e organização das informações analíticas antes da interpretação. Em projetos de exploração mineral, essa etapa é necessária para manter a rastreabilidade das amostras e reduzir inconsistências no banco de dados (CIM, 2018).

A organização deve preservar a relação entre código da amostra, furo, intervalo, certificado analítico, método laboratorial e variável analisada. Também devem ser padronizados nomes de elementos e óxidos, unidades de medida e formatos numéricos, evitando mistura entre ppm e %, duplicidade de códigos, células vazias ou erros de digitação. Outro ponto importante é o tratamento dos limites de detecção. Resultados reportados com símbolos como "<" indicam concentrações abaixo do limite de detecção do método, sendo classificados como dados censurados. Esses valores exigem critério no tratamento, pois podem interferir em cálculos estatísticos, somatórios e comparações entre amostras (Geboy; Engle, 2011). Não existe um único método aplicável a todos os conjuntos de dados censurados. Geboy e Engle (2011) apresentam diferentes procedimentos estatísticos para o tratamento de resultados abaixo do limite de detecção e destacam que a escolha do método deve considerar a quantidade de dados disponível, a proporção de valores censurados e a distribuição dos resultados situados acima do limite de detecção.

Em dados geoquímicos, valores elevados ou discrepantes também precisam ser avaliados com mais critério, pois podem representar anomalias reais, variação litológica, efeito do intemperismo ou inconsistências de amostragem, preparação e análise. A definição de background e anomalia deve considerar o contexto geológico e a distribuição dos dados (Reimann; Filzmoser; Garrett, 2005).

2.8 Controle de qualidade QA/QC em dados geoquímicos

O controle de qualidade em dados geoquímicos é uma etapa fundamental em programas de exploração mineral, pois permite avaliar se os resultados analíticos são confiáveis para interpretação geológica e tomada de decisão. O termo QA/QC reúne dois conceitos complementares: QA, ou garantia da qualidade, corresponde aos procedimentos planejados para prevenir erros ao longo do fluxo de amostragem, preparação, análise e organização dos dados; QC, ou controle da qualidade, corresponde às verificações realizadas para medir se os dados obtidos atendem ao padrão esperado de qualidade (Smee *et al*., 2024).

Em projetos minerais, a qualidade do dado não depende apenas da análise laboratorial, mas de todo o fluxo de geração da informação. Myers (1997) destaca que erros e incertezas podem ser introduzidos desde a etapa de amostragem, especialmente quando o material apresenta heterogeneidade natural. Nesse sentido, a representatividade das amostras, a rastreabilidade dos códigos, a preparação física, o envio ao laboratório, os métodos analíticos e a organização do banco de dados devem ser considerados como partes integradas do controle de qualidade.

Sinclair E Blackwell (2002) ressaltam que a avaliação da qualidade dos dados em inventários minerais deve considerar tanto a consistência do banco de dados quanto o comportamento dos resultados analíticos. Para isso, os dados de controle de qualidade devem ser organizados em pares comparáveis, permitindo avaliar diferenças entre amostras originais e duplicatas, possíveis tendências de viés, dispersão dos resultados e comportamento dos pares ao longo da faixa de teores analisada.

Em programas geoquímicos, os principais controles incluem brancos, padrões certificados, duplicatas, replicatas e controles de preparação. Os brancos são utilizados para verificar possível contaminação durante a preparação ou análise das amostras. Os padrões certificados, também chamados de materiais de referência certificados, permitem avaliar a exatidão analítica, isto é, o quanto o resultado obtido se aproxima de um valor conhecido. As duplicatas e replicatas são utilizadas para avaliar a precisão, a repetibilidade e a reprodutibilidade dos resultados (Geboy; Engle, 2011; CIM, 2018; Abzalov, 2016).

A precisão está relacionada à proximidade entre resultados repetidos para uma mesma amostra ou para materiais equivalentes. Já a exatidão está relacionada à proximidade entre o valor medido e o valor considerado verdadeiro ou certificado. Assim, um conjunto de dados pode ser preciso, quando apresenta resultados muito próximos entre si, mas não necessariamente exato, caso esteja sistematicamente deslocado em relação ao valor real. Por isso, duplicatas e padrões certificados avaliam aspectos diferentes da qualidade analítica.

As duplicatas de campo são especialmente importantes porque incorporam variações ligadas à coleta, homogeneização, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado. Em materiais como solo, regolito ou amostras de trado, a variabilidade pode ser maior do que em materiais mais homogêneos, tornando a avaliação das duplicatas relevante para compreender a representatividade da amostragem. As duplicatas laboratoriais, por sua vez,

tendem a avaliar mais diretamente a precisão associada à preparação e à análise no laboratório (Abzalov, 2016; Smee *et al*., 2024).

A representatividade é outro aspecto central do QA/QC. Uma amostra representativa deve expressar adequadamente o intervalo ou material que se deseja caracterizar. Mesmo análises laboratoriais precisas podem ter pouco valor interpretativo se a amostra original não representar bem o material coletado. Por isso, o controle de qualidade deve considerar não apenas a etapa analítica, mas todo o fluxo de geração do dado geoquímico: coleta, identificação, acondicionamento, preparação, análise, armazenamento e tratamento do banco de dados.

Neste trabalho, o QA/QC foi abordado a partir da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais, com foco na avaliação da precisão, repetibilidade, reprodutibilidade e representatividade dos dados geoquímicos tratados. Brancos, padrões certificados e controles internos do laboratório foram reconhecidos como parte do controle de qualidade analítica, enquanto a avaliação quantitativa foi direcionada aos pares originais–duplicata utilizados nos diagramas de dispersão.

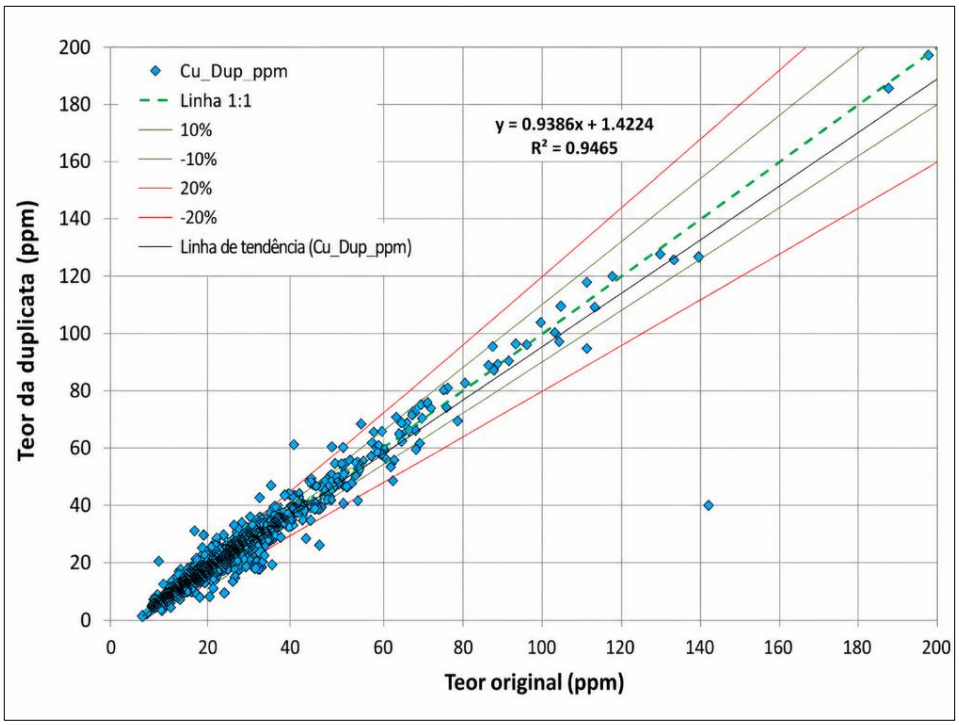
2.8.1 Diagramas de dispersão e avaliação de duplicatas

A avaliação de duplicatas em programas de QA/QC geoquímico é utilizada para verificar a precisão e a reprodutibilidade dos resultados analíticos, permitindo identificar possíveis variações associadas à amostragem, à preparação física da amostra ou à etapa laboratorial. Segundo Piercey (2014), um programa de QA/QC deve monitorar a precisão, a acurácia e a contaminação ao longo de todo o fluxo analítico, desde a coleta até a geração dos resultados finais. Para isso, o autor recomenda a inserção sistemática de duplicatas de amostra, duplicatas de polpa, duplicatas analíticas, materiais de referência e brancos, avaliados por meio de diagramas de dispersão, testes estatísticos, gráficos de Thompson-Howarth e coeficiente médio de variação, ou CVavg(%).

Nos diagramas de dispersão aplicados a duplicatas, os resultados da amostra original são representados no eixo X e os resultados da duplicata no eixo Y. A reta X = Y representa a condição ideal de concordância entre os pares, na qual o valor da duplicata é igual ao valor da amostra original. Assim, quanto mais próximos os pontos estiverem dessa reta, maior é a concordância entre os resultados. Como apresentado na Figura 1, a distribuição dos pontos em

relação à reta X = Y e aos envelopes de variação permite reconhecer pares com boa reprodutibilidade, pares com maior dispersão e possíveis tendências de viés.

Figura 1 - Exemplo de diagrama esquemático de dispersão para avaliação de duplicatas, com comparação entre teor original e teor da duplicata, reta X = Y e envelopes auxiliares de variação de ±10% e ±20%.



Fonte: Adaptado Smee *et al*. (2024).

A utilização dos envelopes de ±10% e ±20%, indicados na Figura 1, permite classificar visualmente o grau de concordância entre os pares original–duplicata. Neste trabalho, o envelope de ±5% foi adotado como referência de alta precisão, o de ±10% como indicativo de boa concordância e o de ±20% como faixa de atenção para a revisão individual dos pares mais dispersos. Esses limites não devem ser interpretados como critérios rígidos de aprovação ou reprovação, mas como faixas auxiliares de interpretação, pois a precisão esperada depende do tipo de duplicata, da matriz analisada, da concentração do elemento, do limite de quantificação e da heterogeneidade natural do material.

Essa interpretação é compatível com Piercey (2014), que indica que, para dados geoquímicos acima do limite de quantificação, valores de CVavg(%) inferiores a 10% são geralmente esperados para duplicatas de campo, enquanto duplicatas de polpa ou analíticas tendem a apresentar maior precisão, com valores em torno de 5% a 7,5%. Abzalov (2016) também ressalta que os níveis de precisão variam conforme o tipo de depósito, o material

analisado e o elemento de interesse, recomendando o uso do CVavg (%) como medida robusta do erro relativo de precisão. Dessa forma, a incorporação do limite de 5% neste trabalho permite diferenciar os pares de excelente concordância daqueles que permanecem satisfatórios, mas apresentam maior dispersão.

Além da análise gráfica, a avaliação quantitativa dos pares original–duplicata pode ser realizada por meio da diferença percentual relativa, ou RPD. Essa métrica expressa a diferença relativa entre os dois resultados analíticos de um mesmo par, sendo útil para comparar diretamente a amostra original e sua duplicata.

Valores baixos de RPD indicam maior proximidade entre original e duplicata, enquanto valores elevados indicam maior dispersão entre os pares. Entretanto, em concentrações próximas ao limite de detecção ou ao limite de quantificação, pequenas diferenças absolutas podem resultar em valores percentuais elevados. Por isso, o RPD deve ser interpretado em conjunto com os diagramas de dispersão, com a posição dos pontos em relação à reta X = Y, com os envelopes de ±5%, ±10% e ±20% e com o comportamento geral do conjunto de dados (Abzalov, 2016; Stanley; Lawie, 2007; Piercey, 2014).

A correlação entre original e duplicata também pode ser avaliada pelo coeficiente de determinação, R^2. Esse coeficiente indica o grau de ajuste dos pontos a uma relação linear entre as duas variáveis analisadas. Valores de R^2 próximos de 1 indicam forte relação linear entre original e duplicata; porém, esse parâmetro não deve ser interpretado isoladamente. Um conjunto de dados pode apresentar R^2 elevado e, ainda assim, estar deslocado em relação à reta X = Y, indicando possível viés sistemático. Por esse motivo, a avaliação da qualidade dos pares deve integrar o R^2, o RPD, os envelopes de variação e a análise visual dos diagramas de dispersão (Sinclair; Blackwell, 2002; Montgomery; Runger, 2018).

A interpretação dos resultados também deve considerar o tipo de duplicata avaliada. Duplicatas de campo tendem a incorporar maior variabilidade, pois refletem não apenas a etapa analítica, mas também a heterogeneidade natural do material, a coleta, a homogeneização e a preparação inicial da amostra. Em materiais como solo, e amostras de trado, essa variabilidade pode ser mais expressiva, especialmente quando os elementos de interesse estão associados a minerais acessórios ou fases de distribuição heterogênea. Já as duplicatas laboratoriais ou de polpa tendem a apresentar menor dispersão, pois avaliam principalmente a repetibilidade da preparação e da análise laboratorial (Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee et al., 2024).

No presente estudo, as duplicatas de campo inseridas pela RAD foram interpretadas como controles associados à variabilidade da amostragem e à heterogeneidade do material amostrado. As duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS foram interpretadas como controles mais diretamente relacionados à repetibilidade da preparação e da análise laboratorial. Assim, a comparação entre esses dois grupos permite avaliar diferentes etapas do processo de geração do dado geoquímico e distinguir variações de natureza amostral, preparatória ou analítica (Abzalov, 2016; Piercey, 2014).

Com base nesses critérios, os pares originais–duplicata foram avaliados por meio de diagramas de dispersão, RPD, R^2 e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%. Essa abordagem foi aplicada aos dados tratados de Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, MREO, TREO+Y, TiO_2 e P_2O_5, com o objetivo de verificar a consistência dos resultados geoquímicos utilizados na avaliação do PTRP.

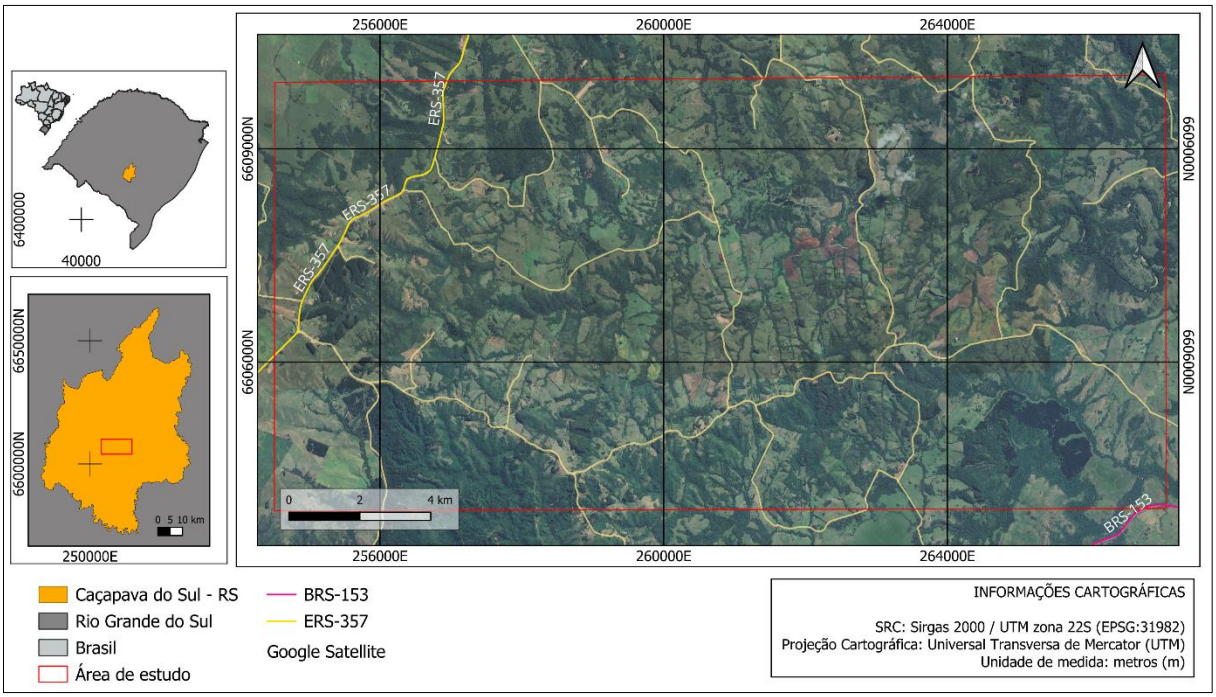
CAPÍTULO 3 ESTUDO DE CASO

3.1 Localização da área de estudo

A área de pesquisa está localizada no município de Caçapava do Sul, na região central do estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 260 km da capital Porto Alegre. O acesso regional ocorre principalmente pela BR-290 até o município de Caçapava do Sul e, a partir da sede municipal, segue-se em direção sudoeste pela rodovia ERS-357, no sentido de Lavras do Sul, conforme apresentado na Figura 2. O acesso local à área de estudo também é favorecido por estradas secundárias e pela proximidade com a BRS-153, permitindo o deslocamento até os pontos de investigação.

No mapa de localização, a área de estudo está delimitada pelo polígono vermelho, inserida em um contexto predominantemente rural, com presença de estradas vicinais, áreas de campo, vegetação e propriedades rurais. A base cartográfica utilizada corresponde à imagem orbital do Google Satellite, com sistema de referência sirgas 2000/ UTM Zona 22S (EPSG: 31982).

Figura 2- Mapa de localização da área de estudo no município de Caçapava do Sul, RS.



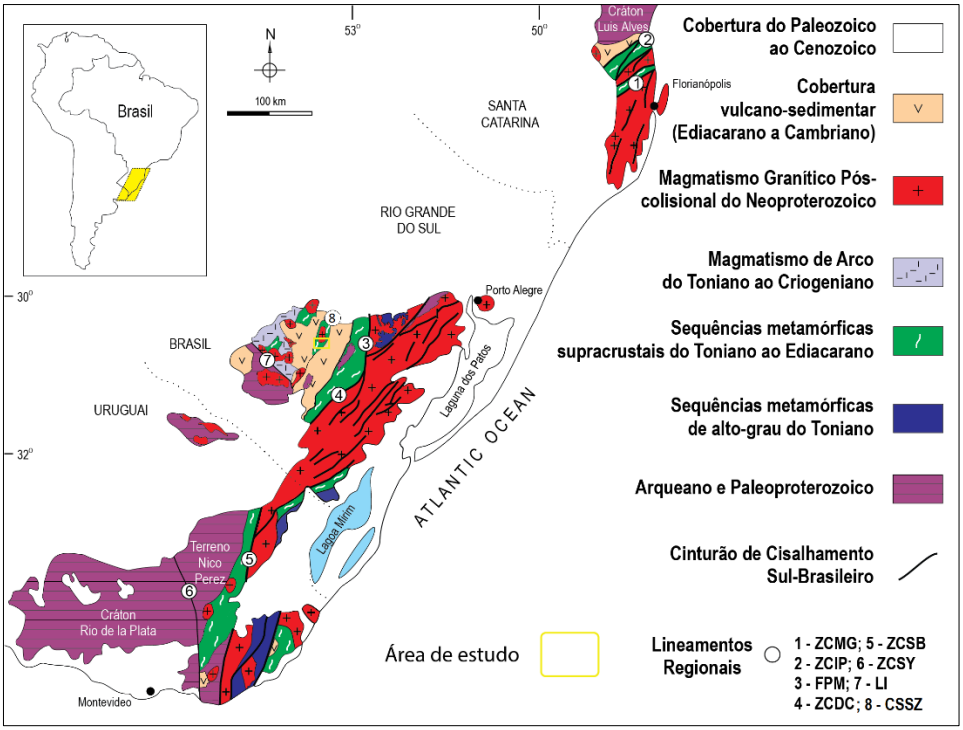
Fonte: Elaborado pela autora, com base em imagem Google Satellite.

3.2 Contexto geológico regional

Cinturão Dom Feliciano

Segundo a revisão de De Toni *et al*. (2024) o CDF representado na Figura 3, desenvolveu-se como parte do Orógeno Gondwana Ocidental durante o Neoproterozoico e o início do Paleozoico, possui cerca de 1200 km de extensão, que se estende pelo sul do Brasil e Uruguai, representando a porção sul-americana do sistema Dom Feliciano–Kaoko–Gariep, formado durante a amalgamação do Gondwana Ocidental (Oriolo *et al*., 2017; Konopásek *et al*., 2018). Limita-se ao norte pelo Cráton Luis Alves e ao sudoeste pelos terrenos Nico Pérez e Piedra Alta (Cráton do Rio da Prata), estando estruturado sobre embasamento arqueano a paleoproterozoico parcialmente recoberto por unidades metavulcanossedimentares do Mesoproterozoico ao Cambriano (Almeida *et al*., 2010, 2012; Pertille *et al*., 2017). Portanto apresentando uma evolução complexa, com estágios pré-, sin- e pós-colisionais. O setor central, onde se insere o BSG, é considerado o mais complexo do orógeno, pois registra desde evidências de arco magmático continental até ambientes de retroarco e fragmentos de ofiolitos relacionados a antigas bacias oceânicas pré-cambrianas. Sua evolução tectonoestratigráfica reflete múltiplos episódios de subducção, colisão e reativações, marcados pela sobreposição de domínios estruturais com diferentes assinaturas geodinâmicas, De Toni *et al*. (2024).

Figura 3 - Mapa de distribuição do Cinturão Dom Feliciano, porção NE setor catarinense, setor central Rio Grande do Sul e setor SW setor Uruguaio. São indicados importantes zonas de cisalhamento e estruturas regionais.



Fonte: Adaptado de, De Toni *et al*., 2024.

Os domínios do CDF no em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, estão divididos por zonas de cisalhamento e lineamentos, como a Zona de Cisalhamento Major Gercino (MGSZ), a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (IPSZ), a Falha Passo do Marinheiro (PMF), a Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu (DCSZ), a Zona de Cisalhamento Sierra Ballena (SBSZ), a Zona de Cisalhamento Sarandi del Yi (SYSZ), o Lineamento Ibaré (IL), Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul (CSSZ), Zona de Cisalhamento Quitéria-Serra do Erval (QSESZ) e Zona de cisalhamento Arroio Grande (AGSZ). Distribuidas no Bloco Taquarembó, Bloco São Gabriel, Faixa de Dobramentos Tijucas, Bloco Encruzilhada, Batólito Pelotas–Florianópolis, e o Bloco Jaguarão parte do Terreno Punta del Este. Como a área de estudo desde trabalho se encontra no Bloco São Gabriel, descreve-se este com mais detalhes.

Bloco São Gabriel

Limitado pelo Lineamento Ibaré a SW (7) e a E pela ZC Caçapava do Sul fig. 3 (8), encontra-se o Bloco São Gabriel, que abriga os registros mais antigos da evolução orogênica do CDF. Esse domínio é caracterizado por eventos de arco intraoceânico do tipo evento Passinho (ca. 930–880 Ma), registrados em ofiolitos, metadioritos e metavulcânicas máficas (Arena *et al*.,

2016; Leite *et al*., 1998), além do evento São Gabriel (770–720 Ma), marcado por magmatismo de arco continental cálcio-alcalino (Philipp *et al*., 2018). Entre 705 e 690 Ma, ocorrem intrusões de tonalitos e dioritos (Babinski *et al*., 1996; Hartmann *et al*., 2011), seguidas pela instalação de granitos pós-colisionais do Ediacarano. Abaixo, detalham-se as litologias do Bloco São Gabriel que se encontram na área de estudo.

- **Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF)** – Bittencourt (1983) o complexo é composto por metapelitos, anfibólio-xistos, gnaisses (inclusive quartzo-feldspáticos), metagabros, rochas metavulcanoclásticas, xistos magnesianos, mármores, quartzitos e metavulcânicas. Para Hoerlle *et al*., (2022) o CMPF é uma associação de metapelitos, anfibolitos, mármores, cálcio-silicatos e metabasaltos, atravessada por diques e soleiras máficas. Acredita-se que essa associação litológica esteja relacionada a uma sequência de margem passiva ou retroarco (Fragoso-Cesar, 1991; Fernandes *et al*., 1992; Philipp *et al*., 2021). Dois eventos metamórficos são reconhecidos (Bitencourt, 1983). O primeiro (M1), de caráter regional, com idades U-Pb em monazitas de xistos pelíticos entre 650–620 Ma (Remus *et al*., 2010). O segundo (M2) está associado ao metamorfismo térmico gerado pela intrusão do Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS), com idade estimada em ca. 557 Ma (Hoerlle *et al*., 2021; 2022). Estudos de proveniência com zircões detríticos em metapelitos e xistos revelam idades arqueanas, paleoproterozoicas e neoproterozoicas, com uma idade deposicional máxima em torno de 774 Ma (Remus *et al*., 2000a; Lopes *et al*., 2015; Souza, 2020; Hoerlle *et al*., 2022).
- **Formação Hilário (FH)** – Possui fácies pelíticas, com pelitos e arenitos em camadas tabulares, maciças ou com acamadamento gradacional normal e inverso, laminação plano-paralela e climbing ripples. Fácies conglomerática, com conglomerados com clastos de vulcânicas e piroclásticas; litarenitos médios a grossos, conglomerático Porcher e Lopes (2000). E Horn et. al., (2024) separa essa unidade em fácies vulcânicas efusivas, compostas por derrames de traquibasaltos, traquiandesitos andesitos e, localmente, dacitos; soleiras e diques de lamprófiros espessartíticos. E a fácies piroclástica e vulcanossedimentar, com depósitos de fluxo, tração e queda, piroclásticos, formando tufos com fragmentos líticos e cristais e camadas de depósito de cinza e níveis com retrabalhamento sedimentar, formando depósitos do tipo lahar, com arenitos e conglomerados vulcanogênicos. Tendo um magmatismo intermediário de afinidade shoshonítica, com idades U-Pd em zircão de idades 593,6±5 Ma; 590,6 Ma e 580±7 Ma.

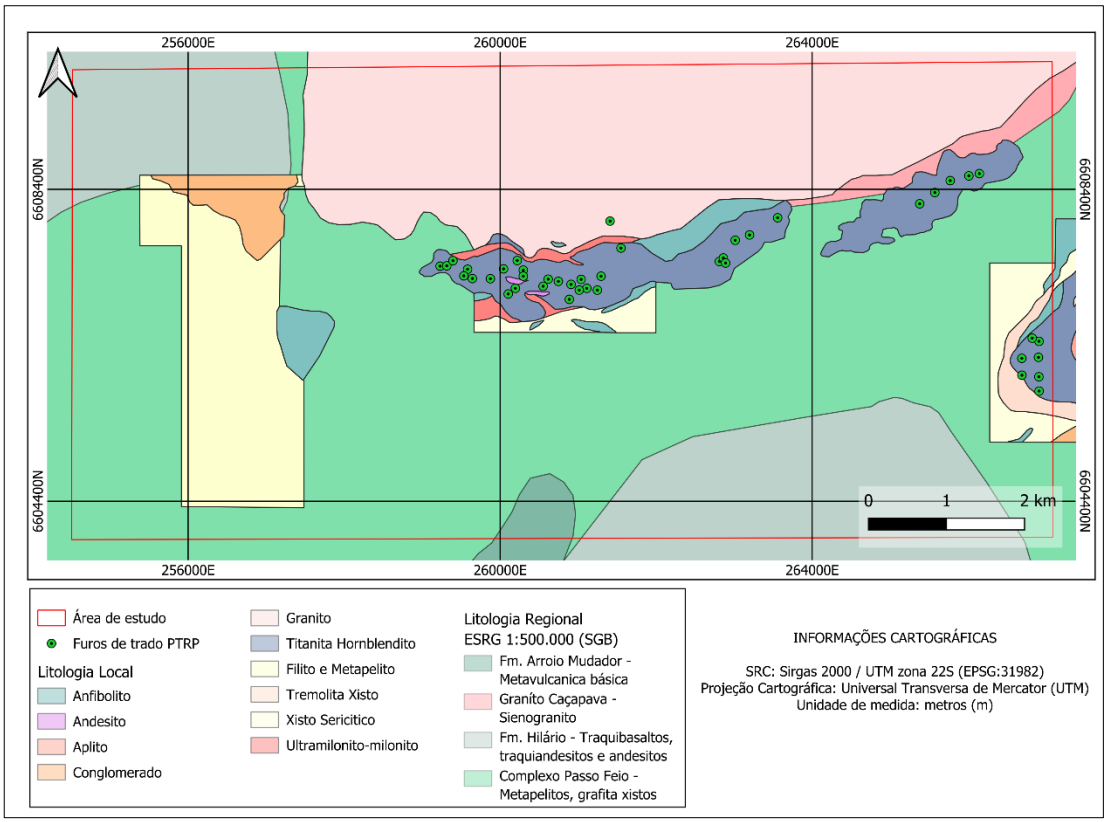
- **Grupo Bom Jardim (GBJ)** – Na Formação Arroio dos Nobres estão presentes os seguintes membros partes da área de estudo. Membro Mangueirão (ou formação Maricá, Porcher e Lopes, 2000) com pelito marrom, maciço ou com laminação plano-paralela, intercalado com camadas tabulares de arenitos muito fino a médio, eventualmente conglomerático, com acamadamento gradacional normal ou inverso, laminação plano-paralela e estratificação cruzada cavalgante e marcas onduladas assimétricas no topo e estruturas de carga na base. Com idade máxima de deposição 601±13 Ma a partir de zircões dentríticos de arenitos arcoseanos (Almeida et. al., 2012) . E o Membro Vargas com conglomerado polimítico arcóseo conglomerático, arcóseo grosso a fino, camadas lenticulares amalgamadas, acamadamento gradacional normal, maciço ou com estratificação cruzada acanalada, (Horn et. al., 2024; Silveira, 2016).
- **Formação Acampamento Velho (FAV)** – Essa unidade apresenta composição variando de basalto a riolito com afinidade shoshonítica (Lima e Nardi, 1998). Já as rochas ígneas incluem rochas básicas, intermediárias com predomínio das rochas ácidas. Sua afinidade é alcalina saturada em sílica ou moderadamente alcalina sódica e caracterizado como um vulcanismo bimodal (Matté *et al*., 2012). Horn et. al., (2024) separa essa formação em facies, onde as que estão presentes nesse trabalho são, fácies vulcânica a subvulcânica acida, com ocorrência de derrames diques e soleiras de riolitos alcalinos e peralcalinos avermelhados, localmente ocorrendo auto-brechas. E a facies piroclástica, com a presença de depósitos de fluxos piroclásticos, tufos-brechas, tufos lapilitícos a cineríticos; ignibritos com feições de fluxo ou do tipo lava-like. Com idades U-Pb e Pb-Pb em zircão de 573±18 Ma; 572±3 Ma e 549±5 Ma, (Horn et. al., (2024).
- **Granitóides Brasilianos (GB)** – Granito Caçapava (CAS) O Granito Caçapava do Sul constitui uma intrusão granítica com aproximadamente 250 km², instalada de forma sincinemática à fase D2-M2 do Complexo Metamórfico Passo Feio, Nardi e Bitterncourt (1989). A composição é composta por monzogranítica e granidiorítica, de granulação fina a grossa, com textura variando de isótopa e protomilonítica, com bandamento gnáissico ocorrendo nos granitóides da borda sudeste do corpo. Fácies sienogranito possui granitóides vermelhor de composição sienogranítica, com poucos minerais máficos e geralmente foliados. Idade por U-Pb de cristalização em zircão em 562±8 Ma, Cruz, Horn e Eglesias (2025).

3.3 Geologia local

A geologia local da área de estudo foi descrita com base no mapeamento geológico realizado pela Referencial Geologia, no âmbito do PTRP, e na base geológica regional do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). A área está localizada na porção sul do município de Caçapava do Sul, inserida no contexto geológico do Bloco São Gabriel, no Escudo Sul-rio-grandense.

Além do mapeamento geológico local previamente disponível, foi realizada neste trabalho uma ampliação e reinterpretação do polígono geológico da área de estudo, apresentada na Figura 4. Essa etapa foi desenvolvida a partir da integração entre as descrições litológicas das amostras de trado, registradas em chip trays (testemunhos de solo), a distribuição espacial dos furos e os dados geofísicos aéreos e terrestres. Essa integração permitiu refinar a delimitação das unidades litológicas na área investigada, especialmente nas porções associadas à titanita hornblendita, anfibolitos, xistos e demais unidades metamórficas relacionadas ao Complexo Metamórfico Passo Feio.

Figura 4 - Mapa geológico local reinterpretado da área de estudo, com a distribuição dos furos de trado do PTRP, Caçapava do Sul, RS.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do mapeamento geológico local da Referencial Geologia, das descrições litológicas das amostras de trado, da distribuição dos furos e da integração com dados geofísicos aéreos e terrestres do PTRP.

Conforme o mapa geológico local reinterpretado na figura 4, a área de estudo é composta por rochas metamórficas correlacionadas ao Complexo Metamórfico Passo Feio, unidades máficas a ultramáficas, litologias metassedimentares, zonas deformacionais e unidades graníticas associadas ao Granito Caçapava. A base regional do SGB/CPRM indica, no entorno da área, unidades do Complexo Passo Feio, Formação Hilário e Granito Caçapava, enquanto o mapeamento local e a reinterpretação realizada neste trabalho detalham as litologias presentes na área investigada.

O Complexo Metamórfico Passo Feio constitui a unidade regional predominante na área de estudo, sendo representado por metapelitos, grafita xistos, filitos, xistos sericíticos, anfibolitos, tremolita xistos e rochas cálcio-magnesianas. Essas litologias ocupam grande parte da área, principalmente nas porções central, sul, oeste e sudeste. Na porção norte da área ocorre o Granito Caçapava, representado principalmente pela fácies sienogranítica. Essa unidade aparece em contato com as rochas metamórficas do Complexo Passo Feio e ocupa a borda norte

da área mapeada. Regionalmente, o Granito Caçapava é descrito como uma intrusão de composição monzogranítica a granodiorítica, com fácies sienogranítica localmente foliada.

A titanita hornblendita ocorre como uma faixa alongada, com orientação geral leste-oeste a sudoeste-nordeste, acompanhando a porção norte a centro-norte da área. Essa unidade aparece em contato com o Granito Caçapava, anfibolitos, xistos sericíticos e metapelitos. Parte dos furos de trado do PTRP está distribuída sobre essa faixa litológica e em suas proximidades. Os anfibolitos ocorrem como lentes e faixas associadas à titanita hornblendita, principalmente nas porções central, centro-leste, leste e sudeste da área. Essas unidades aparecem em contato com rochas metapelíticas, xistos sericíticos, tremolita xisto e titanita hornblendita.

Na porção leste a sudeste da área observa-se uma associação litológica composta por titanita hornblendita, anfibolito, tremolita xisto e xisto sericítico. O tremolita xisto ocorre de forma mais restrita nessa porção da área, associado a rochas metamórficas cálcio-magnesianas. O xisto sericítico também aparece de forma localizada, principalmente em contato com unidades máficas e metapelíticas. As faixas de ultramilonito-milonito ocorrem de forma estreita e descontínua, principalmente ao longo dos contatos entre granito, titanita hornblendita, anfibolito e xistos sericíticos. Essas unidades apresentam distribuição alongada e acompanham parte das faixas máficas mapeadas.

Nas porções oeste e centro-oeste da área ocorrem filitos e metapelitos, associados às rochas metassedimentares do Complexo Passo Feio. Essas unidades estão em contato com domínios de xisto sericítico e com lentes subordinadas de anfibolito. Na porção norte a noroeste da área também ocorre uma faixa de conglomerado, em contato com unidades metamórficas. No entorno da área de estudo ocorrem unidades relacionadas à Formação Hilário, representadas por traquibasaltos, traquiandesitos e andesitos. Essas unidades aparecem principalmente fora ou próximas aos limites da área investigada, compondo o contexto geológico regional imediato.

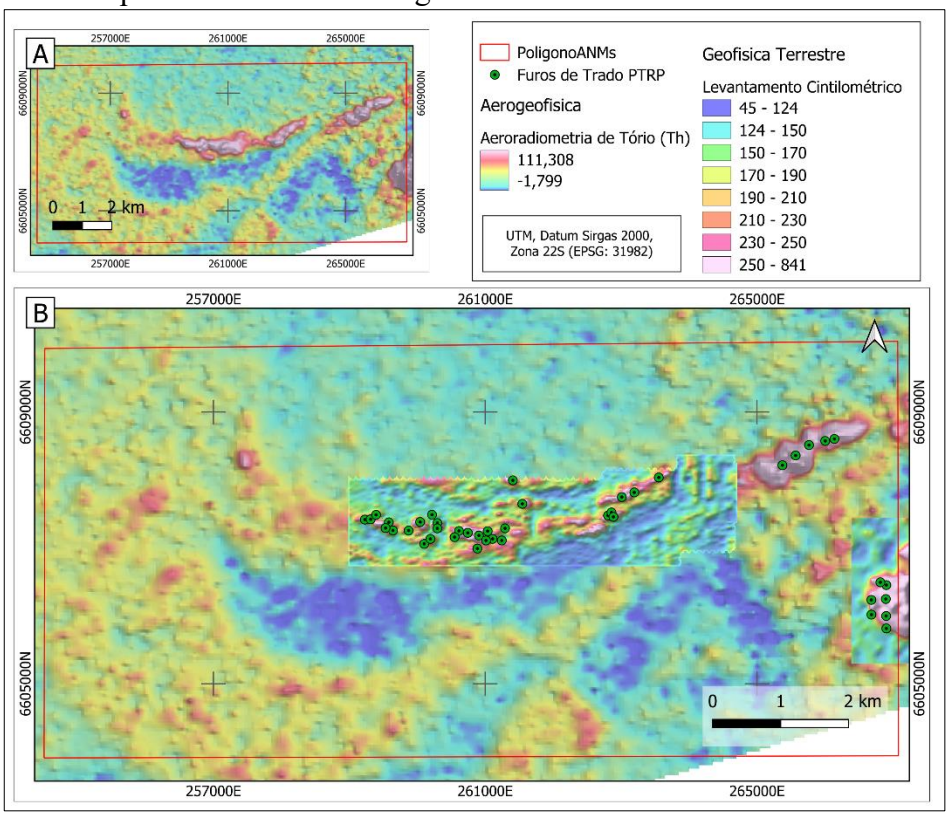
Os furos de trado do PTRP estão distribuídos principalmente ao longo da faixa de titanita hornblendita e nas proximidades dos contatos com anfibolito, xisto sericítico, tremolita xisto e metapelitos. Também há furos localizados na porção leste/sudeste da área, onde ocorre maior diversidade de unidades litológicas locais. De modo geral, a geologia local da área de estudo é composta por metapelitos, grafita xistos, filitos, xistos sericíticos, anfibolitos, titanita hornblendita, tremolita xisto, ultramilonito-milonito, conglomerado e granito. Essas unidades estão inseridas no contexto regional do Complexo Metamórfico Passo Feio, com presença do Granito Caçapava na porção norte e unidades da Formação Hilário no entorno.

3.4 Geofísica aérea e terrestre

Os dados aerogeofísicos utilizados neste trabalho correspondem a produtos previamente processados do levantamento aeromagnetométrico e gamaespectrométrico executado pela LASA Prospecções S.A. para a Referencial Geologia Mineração e Meio Ambiente Ltda., no âmbito do Projeto Primavera. Neste estudo, não foi realizado reprocessamento dos dados gamaespectrométricos brutos; a aeroradiometria de tório foi utilizada como produto geofísico já processado, em formato de mapa/grid de concentração aparente de eTh, com finalidade de apoio à interpretação regional e à integração com a geologia local, os furos de trado e os dados de cintilometria terrestre.

De acordo com o relatório técnico do levantamento, a aquisição foi realizada com linhas de voo espaçadas de 200 m, linhas de controle espaçadas de 2.000 m e altura média de voo de 100 m sobre o terreno. O processamento gamaespectrométrico incluiu correções de tempo morto, background cósmico e da aeronave, radônio, efeito Compton, correção altimétrica e conversão das contagens por segundo para concentrações aparentes dos radioelementos, incluindo eTh em ppm (LASA Prospecções, 2010). Dessa forma, no presente trabalho, o canal de tório foi empregado apenas como camada interpretativa, por meio da sobreposição cartográfica com os dados geológicos, cintilométricos e geoquímicos do PTRP. A geofísica aérea é representada pela aeroradiometria de tório (Th), enquanto a geofísica terrestre corresponde ao levantamento cintilométrico de campo, com valores expressos em contagens por segundo (CPS).

Figura 5 - Integração dos dados de geofísica aérea e terrestre da área de estudo do PTRP, Caçapava do Sul, RS. A) Aeroradiometria de tório (Th), com base em dados aerogeofísicos do Referencial Geologia. B) Sobreposição da aeroradiometria de tório, dos dados de cintilometria terrestre realizados pela Referencial Geologia e dos furos de trado do PTRP.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados aerogeofísicos da LASA Prospecções S.A, levantamento cintilométrico de campo da Referencial Geologia e banco de furos do PTRP.

A aeroradiometria de tório fornece uma visão regional da distribuição dos radioelementos na superfície, sendo útil para reconhecer variações geofísicas associadas ao contexto geológico da área. No mapa integrado, essa informação é apresentada no painel A Figura 5-A, localizado no canto superior esquerdo da figura, onde se observa a distribuição regional dos valores de Th na área de estudo.

A cintilometria terrestre, por sua vez, apresenta maior detalhamento local, pois as medidas são obtidas diretamente em campo. Esses dados representam a intensidade da radiação gama natural emitida pelos materiais superficiais, principalmente relacionada aos radioelementos potássio, urânio e tório. Como a radiação gama sofre atenuação no solo e nas rochas, a resposta cintilométrica reflete principalmente os primeiros centímetros do regolito e dos materiais superficiais. Na área de estudo, os valores de cintilometria variam aproximadamente entre 45 e 841 CPS, sendo classificados em intervalos de intensidade radiométrica. Os menores valores são representados por tonalidades frias, enquanto os maiores valores aparecem em tons quentes a rosados. No painel B, correspondente ao mapa principal na

figura 5-B, os dados de cintilometria terrestre foram sobrepostos à aeroradiometria de tório e aos furos de trado do PTRP, permitindo visualizar a relação espacial entre a amostragem geoquímica e as variações radiométricas observadas em superfície.

De modo geral, o painel A apresenta o comportamento regional da aeroradiometria de tório mostrado na figura 5-A, enquanto o painel B mostra o detalhamento local obtido pela integração entre aerogeofísica, cintilometria terrestre e furos de trado pontos em verde na figura 5-B. Essa integração fornece uma base importante para a caracterização geofísica da área de estudo e para o suporte à análise geoquímica desenvolvida neste trabalho.

3.5 Dados disponíveis

Os dados utilizados neste trabalho correspondem ao banco gerado no âmbito do PTRP, composto por informações de sondagem à trado, identificação dos furos, intervalos amostrados, resultados analíticos multielementares e amostras de controle de qualidade. Esses dados foram organizados com o objetivo de permitir a rastreabilidade entre os furos, os intervalos amostrados, os códigos das amostras, os resultados laboratoriais e os pares utilizados na avaliação de QA/QC.

A base de sondagem contempla 43 furos de trado, identificados pelo prefixo AUGTR_0001 a AUGTR_0043, totalizando 284,45 m perfurados. Para cada furo, foram registradas informações de identificação e profundidade final, utilizadas na organização do banco de dados e na correlação com os intervalos amostrados. A síntese dos furos e suas respectivas profundidades finais é apresentada no Apêndice C. As amostras foram coletadas em intervalos regulares de 1 m, organizadas em lotes e encaminhadas ao laboratório SGS Geosol Laboratórios S.A. As análises químicas foram emitidas em seis certificados analíticos: GQ2602230, GQ2602231, GQ2602232, GQ2602449, GQ2605221 e GQ2605223. Esses certificados compõem a base laboratorial utilizada para a organização do banco geoquímico e para a seleção das amostras de controle de qualidade.

Os resultados analíticos contemplam óxidos maiores, elementos traço, elementos terras raras e perda ao fogo (LOI). Entre os dados utilizados neste trabalho, destacam-se os elementos terras raras posteriormente convertidos para óxidos, os somatórios MREO e TREO+Y, além dos óxidos maiores TiO_2 e P_2O_5, utilizados como variáveis litogeoquímicas complementares na avaliação de QA/QC.

Para a avaliação de QA/QC, foram selecionados pares de amostras originais e duplicatas de campo inseridas pela RAD, além de duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS. Esses pares foram organizados em tabela tratada, contendo as variáveis utilizadas na comparação entre amostras originais e duplicatas. A tabela tratada utilizada na avaliação de QA/QC é apresentada no Apêndice A.

3.6 Amostragem

A campanha de sondagem à trado do PTRP foi realizada entre 28 de novembro de 2025 e 06 de março de 2026, totalizando 43 furos com comprimento médio 6,62 m/furo e 284,45 metros perfurados na área de estudo. A campanha foi conduzida com trado motorizado Honda 160, sendo a locação dos furos definida com base nas anomalias de geofísicas aéreas e terrestres identificadas em levantamentos geofísicos previamente realizados na área Figura 5-B.

Os furos foram locados em campo com auxílio de GPSMAP Garmin 65S, utilizando o sistema de coordenadas UTM, zona 22S, Datum SIRGAS 2000. O diâmetro inicial dos furos foi de 152 mm até a profundidade de 0,5 m, passando, a partir desse intervalo, para 104 mm até a profundidade final figura 6-C. Após a execução as bocas dos furos foram posteriormente tamponadas com material rochoso do próprio local, recobertas com solo figura 6-E e F e devidamente identificadas com estacas de madeira figura 6-G seguindo boas práticas operacionais, ambientais e de segurança.

Figura 6 - Etapas de execução da sondagem à trado e identificação dos furos em campo no Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP). **A)** Preparo da área a ser perfurada no ponto previamente definido; **B)** Detalhe da abertura do furo e da base utilizada para orientar e estabilizar o conjunto de perfuração; **C)** Operação do trado motorizado Honda 160, com acoplamento das hastes durante o avanço da sondagem; **D)** Retirada do material recuperado pelo trado e disposição sobre lona para inspeção; **E)** Fragmento rochoso utilizado como tampão do furo já executado; **F)** Operação de tamponagem do furo com selo local; **G)** identificação do furo AUGTR_0025 por meio de marco de madeira instalado no local.



Fonte: Autora em PTRP / RAD Mineração e Metalurgia

As amostras provenientes das sondagens à trado foram coletadas em intervalos regulares de 1 metro. Durante a coleta, o material foi disposto sobre lonas plásticas previamente higienizadas, com o objetivo de evitar contaminação cruzada e preservar a integridade das amostras. Em seguida, foi realizado o destorroamento e a homogeneização do material, buscando garantir a representatividade das amostras coletadas Figura 7-A, B e C.

Figura 7 - Etapas de homogeneização, quarteamento e acondicionamento das amostras de sondagem à trado. **A–B)** Homogeneização manual do material amostrado por movimentação e revolvimento sobre lona plástica; **C)** disposição da amostra sobre a lona, acompanhada da identificação do furo e do intervalo amostrado; **D)** divisão do material em quatro porções para realização do quarteamento; **E)** coleta das frações selecionadas com auxílio de pá plástica e transferência para os recipientes de acondicionamento; **F)** distribuição do material quarteado em sacos individuais; **G)** fechamento e organização das amostras acondicionadas, mantendo-se a identificação correspondente ao furo e ao intervalo de coleta.



Fonte: Autora em PTRP / RAD Mineração e Metalurgia

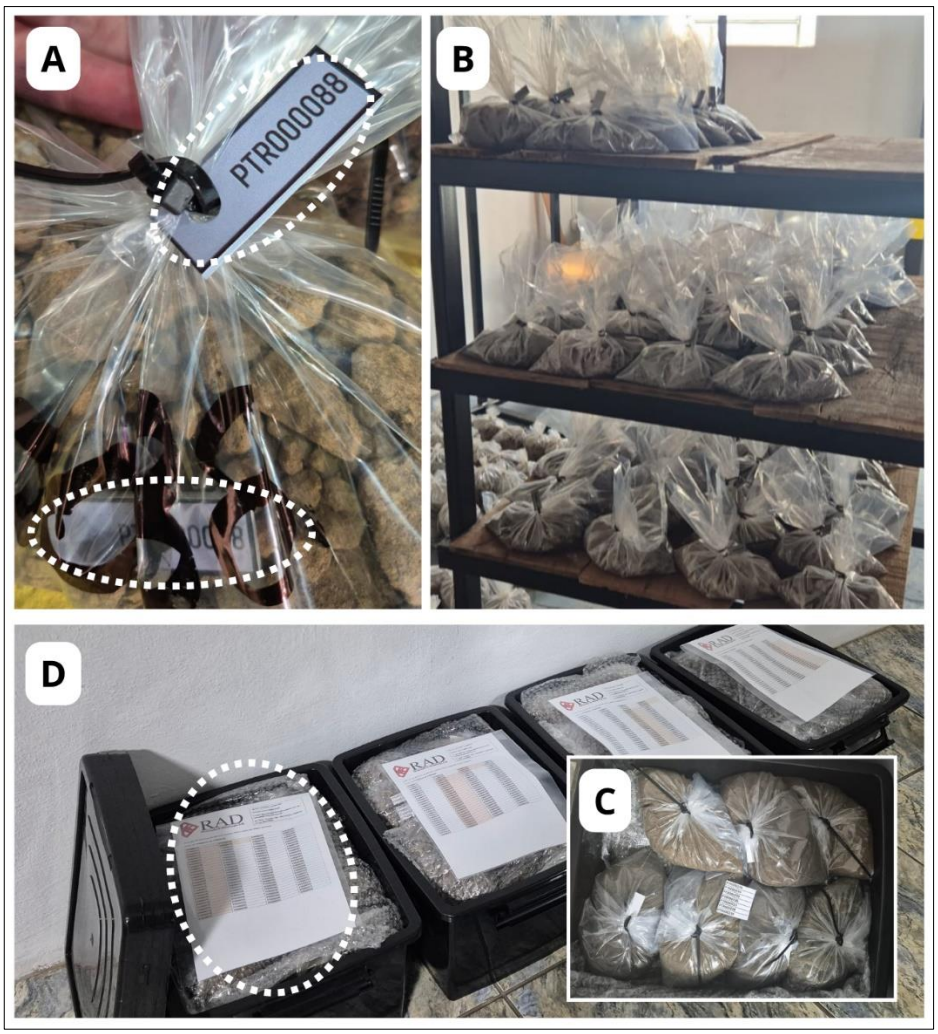
Após a homogeneização, o material foi acondicionado em sacos plásticos devidamente identificados com o número do furo e o respectivo intervalo amostrado, assegurando a rastreabilidade das amostras ao longo de todo o processo mostrados 7-E, F e G. Ao término de cada turno de campo, as amostras eram organizadas, acondicionadas em veículo apropriado e transportadas até o galpão de apoio. No galpão, as amostras foram entregues ao geólogo responsável, que realizou o controle, a conferência, o manuseio técnico e o armazenamento adequado do material, conforme os procedimentos internos estabelecidos pela empresa. Essa etapa permitiu a organização física das amostras e a manutenção da rastreabilidade entre os furos, os intervalos amostrados e o banco de dados geoquímico utilizado neste trabalho.

3.7 Preparação e envio das amostras

Após a etapa de amostragem em campo, foi realizada a preparação inicial do material coletado, com separação de aproximadamente 1 kg de material representativo de cada amostra, incluindo as amostras duplicatas destinadas ao controle de qualidade. Durante essa etapa, buscou-se preservar a representatividade do material amostrado, especialmente nos intervalos em que foi observada a presença conjunta de solo e fragmentos de rocha. Nesses casos, a separação foi feita de forma proporcional, incluindo tanto a fração pedológica quanto os fragmentos rochosos, de modo a manter as características composicionais do intervalo coletado.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos resistentes e devidamente identificadas por meio de etiquetas impermeáveis, inseridas tanto no interior quanto na parte externa da embalagem, garantindo a rastreabilidade do material durante o armazenamento, transporte e recebimento no laboratório como pode ser observada na figura 8-A. Após a identificação, os sacos foram fechados e isolados com lacre plástico ou abraçadeira de nylon, reduzindo o risco de abertura acidental, perda de material, troca de amostras ou contaminação cruzada.

Figura 8 - Etapas de acondicionamento, identificação, organização e preparação das amostras para envio ao laboratório. A) Amostra individual acondicionada em saco plástico, identificada por etiquetas impermeáveis interna e externa e fechada com lacre plástico numerado; B) amostras acondicionadas e organizadas temporariamente em prateleiras, preservando-se a identificação e a rastreabilidade; C) agrupamento das amostras em embalagens maiores para organização e transporte; D) acondicionamento das amostras em caixas de transporte, acompanhadas das respectivas relações de amostras e documentos de controle, para posterior envio ao laboratório.



Fonte: Autora em PTRP / RAD Mineração e Metalurgia.

Após o acondicionamento individual, na figura 8-B mostra as amostras foram organizadas em lotes e armazenadas em prateleiras no galpão de apoio até o momento do envio para análise química. Essa organização permitiu o controle físico das amostras e a conferência dos códigos de identificação antes da expedição ao laboratório. As amostras preparadas foram agrupadas e conferidas antes do envio, mantendo a identificação individual de cada saco amostral e a organização por lotes como mostra a figura 8-C. Na figura 8-D mostra os lotes

acondicionados em caixas plásticas para transporte, acompanhados da documentação correspondente e das listas de controle das amostras encaminhadas ao laboratório.

O envio das amostras ao laboratório SGS Geosol Laboratórios S.A. ocorreu em três etapas distintas: 23/01/2026, com 144 amostras; 12/02/2026, com 66 amostras; e 16/03/2026, com 102 amostras, totalizando 312 amostras enviadas para análise. Esse procedimento permitiu o acompanhamento progressivo dos resultados analíticos e a organização do fluxo de trabalho ao longo da execução do projeto.

3.8 Metodologia de análise química

As análises químicas das amostras do PTRP foram realizadas pelo laboratório SGS Geosol Laboratórios S.A., conforme os 6 certificados analíticos emitidos para os lotes de amostras do projeto: GQ2602230, GQ2602231, GQ2602232, GQ2602449, GQ2605221 e GQ2605223. Os métodos empregados compreenderam etapas de preparação física, secagem, britagem, pulverização, controle de qualidade da preparação e determinação química multielementar por espectrometria com plasma indutivamente acoplado.

Inicialmente, as amostras foram submetidas à secagem a aproximadamente 105 °C, conforme o procedimento PREP DRY105, com o objetivo de remover a umidade residual do material. Em seguida, foi realizada a preparação física pelo método PRP70J_A2, que consiste na britagem do material até 75% abaixo de 3 mm e posterior pulverização de aproximadamente 250 g de amostra, com granulometria final de 95% inferior a 150 mesh. A homogeneização do material foi realizada com auxílio de divisor tipo Jones, buscando garantir maior representatividade da alíquota encaminhada para análise.

A determinação dos óxidos maiores, elementos traço e elementos terras raras foi realizada por digestão total por fusão com metaborato de lítio, seguida de leitura por ICP-OES e ICP-MS. Para os óxidos maiores e alguns elementos traço, foi utilizado o método ICP95A. Para os elementos terras raras e demais elementos traço em baixos teores, foi utilizado o método IMS95A. A fusão com metaborato de lítio é adequada para amostras geológicas, pois permite a abertura da matriz mineral e a solubilização de fases mais resistentes, possibilitando a determinação de elementos presentes em minerais refratários.

Os resultados dos óxidos maiores foram reportados principalmente em porcentagem (%), incluindo Al_2O_3, CaO, Cr_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, MgO, MnO, Na_2O, P_2O_5, SiO_2 e TiO_2. Já os

elementos traço e elementos terras raras foram reportados em partes por milhão (ppm), incluindo Ba, Sr, Zn, Zr, V, Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Mo, Nb, Ni, Rb, Sn, Ta, Th, Tl, U, W e Y, além dos elementos terras raras La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu.

A perda ao fogo, ou LOI (Loss on Ignition), foi determinada pelo método PHY95A, por calcinação da amostra a 1000 °C. Esse parâmetro corresponde à variação de massa associada à liberação de componentes voláteis durante o aquecimento, como água estrutural, matéria orgânica, carbonatos e outros constituintes presentes na amostra. A síntese dos métodos de preparação e análise química utilizados pela SGS Geosol para as amostras do PTRP é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2- Métodos de preparação e análise química utilizados pela SGS Geosol para as amostras do PTRP.

Etapa	Método	Finalidade
Secagem	PREP DRY105	Secagem das amostras a aproximadamente 105 °C
Preparação física	PRP70J_A2	Britagem, pulverização e homogeneização com divisor Jones
Controle da preparação	PREPQC	Controle de qualidade da preparação física
Óxidos maiores e elementos traço	ICP95A	Fusão com metaborato de lítio e leitura por ICP-OES/ICP-MS
Elementos terras raras e traços	IMS95A	Fusão com metaborato de lítio e leitura por ICP-OES/ICP-MS
Perda ao fogo	PHY95A	LOI por calcinação a 1000 °C

Fonte: Elaborado pela autora com base nos certificados analíticos da SGS Geosol.

A fusão com metaborato de lítio é adequada aos objetivos deste trabalho por favorecer a abertura de fases minerais resistentes que podem hospedar ETR. Segundo Piercey (2014), em estudos litogeoquímicos envolvendo ETR e elementos-traço, métodos de digestão total contribuem para a dissolução completa da matriz antes da determinação por ICP-OES e ICP-MS. Assim, os resultados analíticos foram considerados adequados para a conversão em óxidos, o cálculo de TREO+Y e MREO e a avaliação dos pares original–duplicata.

Os certificados analíticos apresentam os limites de detecção para cada elemento ou óxido analisado, bem como as siglas utilizadas pelo laboratório. Valores precedidos pelo símbolo “<” indicam concentrações abaixo do limite de detecção do método. Também são

registradas siglas como BLK, referente a branco; STD, referente a padrão certificado; DUP, referente a duplicata; e REP, referente a replicata. Outras siglas, como N.A., OVR, I.N.F. e I.S., indicam situações específicas de não análise, alto teor, interferência analítica ou amostra insuficiente.

O controle de qualidade da preparação física foi realizado por meio do procedimento PREPQC. Além disso, o controle de qualidade laboratorial incluiu a inserção de amostras branco, padrões certificados, duplicatas e replicatas analíticas. Os brancos foram utilizados para monitorar possíveis contaminações durante a preparação e a análise; os padrões certificados permitiram verificar a exatidão dos resultados; as duplicatas foram utilizadas para avaliar a precisão analítica; e as replicatas contribuíram para a avaliação da reprodutibilidade dos resultados.

Dessa forma, a metodologia analítica adotada possibilitou a obtenção de um banco geoquímico multielementar, contemplando óxidos maiores, elementos traço, elementos terras raras e perda ao fogo. Esses dados foram utilizados como base para a conversão dos elementos terras raras para seus respectivos óxidos, cálculo dos somatórios MREO e TREO+Y e posterior avaliação da qualidade analítica por meio da comparação entre amostras originais, duplicatas de campo e laboratoriais.

3.9 Controle de qualidade analítica

O controle de qualidade analítica, ou QA/QC, foi adotado com o objetivo de avaliar a confiabilidade dos dados geoquímicos utilizados neste trabalho, uma vez que procedimentos como brancos, padrões certificados, duplicatas e controles de preparação são fundamentais para verificar contaminação, exatidão, precisão e reprodutibilidade em programas de exploração mineral (Geboy; Engle, 2011; CIM, 2018; Smee *et al*., 2024).

No PTRP, esse controle envolveu procedimentos de campo, preparação física e análise laboratorial. Durante a etapa de campo e preparação das amostras, a RAD Mineração e Metalurgia inseriram duplicatas com frequência aproximada de uma duplicata a cada 20 amostras. Essas duplicatas de campo foram organizadas em pares amostrais, compostos por uma amostra original e sua respectiva duplicata, permitindo avaliar a repetibilidade dos resultados, a homogeneização e a representatividade do material coletado, uma vez que

duplicatas são utilizadas para estimar a precisão dos dados nas diferentes etapas de amostragem, preparação e análise (Smee *et al*., 2024).

No laboratório, a SGS Geosol também realizou controles internos de qualidade, incluindo brancos, padrões certificados, duplicatas e replicatas analíticas, identificados nos certificados pelas siglas BLK, STD, DUP e REP. Esses controles foram utilizados pelo laboratório para monitorar contaminações, verificar a exatidão analítica, avaliar a precisão e acompanhar a reprodutibilidade dos resultados. A síntese dos tipos de controle de qualidade utilizados nos dados geoquímicos do PTRP é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3- Tipos de controle de qualidade utilizados nos dados geoquímicos do PTRP.

Tipo de controle	Sigla	Origem	Finalidade
Branco	BLK	SGS	Verificar possível contaminação
Padrão certificado	STD	SGS	Avaliar exatidão analítica
Duplicata de campo	DUP/RAD	RAD	Avaliar coleta, homogeneização e representatividade
Duplicata laboratorial	DUP	SGS	Avaliar precisão analítica
Replicata laboratorial	REP	SGS	Controle interno de reprodutibilidade laboratorial
Controle de preparação	PREPQC	SGS	Avaliar qualidade da preparação física

Fonte: Elaborado pela autora com base nos certificados analíticos da SGS Geosol e procedimentos internos do PTRP.

Neste trabalho, a avaliação quantitativa de QA/QC foi direcionada às duplicatas de campo inseridas pela RAD e às duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS. A comparação entre amostras originais e duplicatas foi realizada com foco nos óxidos de terras raras magnéticas Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7, nos somatórios MREO e TREO+Y, além dos óxidos maiores TiO_2 e P_2O_5, utilizados como variáveis litogeoquímicas complementares. Os resultados foram avaliados por meio de diagramas de dispersão original versus duplicata, com a reta X=Y de referência e faixas auxiliares de variação de ±5%, ±10% e ±20%, conforme apresentado no Capítulo 4. A faixa de ±5% foi utilizada como referência de alta precisão, a faixa de ±10% como indicativo de boa concordância e a faixa de ±20% como limite de atenção para identificação de pares que requerem avaliação individual. Esses limites foram adotados como

critérios práticos de triagem visual e quantitativa, sem representar limites universais de aceitação ou rejeição dos dados.

3.10 Tratamento dos dados geoquímicos

Após o recebimento dos resultados analíticos, foi realizado o tratamento dos dados geoquímicos com o objetivo de organizar, padronizar e preparar o banco de dados para a avaliação de QA/QC no software Excel 2021. Essa etapa foi necessária porque os dados originais foram disponibilizados em formato multielementar, contendo óxidos maiores, elementos-traço, elementos terras raras, controles laboratoriais, códigos de amostras e diferentes unidades de concentração. Dessa forma, o tratamento buscou garantir a rastreabilidade, a consistência e a compatibilidade dos dados antes de sua utilização nas análises apresentadas no Capítulo 4.

Inicialmente, os dados brutos foram organizados em planilha eletrônica, preservando os códigos originais das amostras, a empresa associada ao controle de qualidade, o tipo de amostra e a identificação dos registros vinculados ao QA/QC. Em seguida, foram incorporadas informações de rastreabilidade, como furo, intervalo amostrado e permitindo relacionar cada resultado geoquímico ao seu respectivo contexto de coleta.

A padronização do banco consistiu na organização das colunas por elemento ou óxido analisado, com indicação da respectiva unidade de concentração. Os óxidos maiores reportados diretamente pelo laboratório, como P_2O_5, e TiO_2, foram mantidos em porcentagem (%). Já os elementos-traço e os elementos terras raras foram organizados em partes por milhão (ppm), conforme apresentados nos certificados analíticos.

Os valores acompanhados pelo símbolo "<", indicativos de concentrações abaixo do limite de detecção do método analítico, foram padronizados para permitir o tratamento numérico dos dados. Para isso, o símbolo foi removido e o valor numérico informado pelo laboratório foi mantido na tabela. Assim, valores como "<0,05" passaram a ser registrados numericamente como 0,05. Marcações textuais não numéricas, quando presentes, foram preservadas como informação de controle e não utilizadas nos cálculos geoquímicos.

Após a padronização inicial, os elementos terras raras foram convertidos para seus respectivos óxidos por meio de fatores estequiométricos. Essa conversão foi necessária porque, em projetos voltados à avaliação de terras raras, os resultados são frequentemente expressos na forma de óxidos, permitindo o cálculo de somatórios como TREO+Y e MREO. Os elementos

La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu e Y foram convertidos para seus respectivos óxidos, mantendo a unidade em ppm.

A conversão dos elementos terras raras para óxidos foi realizada por meio da multiplicação da concentração elementar pelo respectivo fator estequiométrico. De forma geral, a conversão foi aplicada conforme a expressão (1):

$$\textbf{Óxido correspondente (ppm)} = \textbf{Elemento (ppm) X Fator de conversão} \quad \textbf{(1)}$$

Os fatores de conversão utilizados correspondem à razão entre a massa molar do óxido e a massa do elemento presente nesse óxido. De forma geral, a massa molar do óxido foi calculada conforme a expressão (2):

$$\textbf{Massa molar do óxido} = (\textbf{nº de átomos do elemento} \times \textbf{massa atômica do elemento}) + (\textbf{nº de átomos de O} \times \textbf{massa atômica do O}) \quad \textbf{(2)}$$

Em seguida, o fator de conversão foi obtido pela relação (3):

$$\textbf{Fator de conversão} = \textbf{Massa molar do óxido / Massa do elemento presente no óxido} \quad \textbf{(3)}$$

Para óxidos do tipo RE_2O_3, a massa molar foi calculada considerando dois átomos do elemento terra rara e três átomos de oxigênio. Para óxidos com fórmulas diferentes, como CeO_2, Pr_6O_{11} e Tb_4O_7, foram utilizados os respectivos números de átomos presentes em cada fórmula química.

Os fatores de conversão utilizados para os elementos terras raras e o ítrio empregados no cálculo de TREO+Y e MREO são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Fatores de conversão dos elementos terras raras e do ítrio para seus respectivos óxidos.

Elemento	Óxido calculado	Fator de conversão
La	La_2O_3	1,1728
Ce	CeO_2	1,2284
Pr	Pr_6O_{11}	1,2082
Nd	Nd_2O_3	1,1664
Sm	Sm_2O_3	1,1596
Eu	Eu_2O_3	1,1579
Gd	Gd_2O_3	1,1526
Tb	Tb_4O_7	1,1762
Dy	Dy_2O_3	1,1477
Ho	Ho_2O_3	1,1455
Er	Er_2O_3	1,1435
Tm	Tm_2O_3	1,1421
Yb	Yb_2O_3	1,1387
Lu	Lu_2O_3	1,1371
Y	Y_2O_3	1,2699

Fonte: Elaborado pela autora com base nos fatores de conversão elemento–óxido do Advanced Analytical Centre, James Cook University, e nas massas atômicas recomendadas pela IUPAC/CIAAW.

O detalhamento dos fatores de conversão, incluindo o número de átomos, as massas atômicas utilizadas, a massa molar dos óxidos e a relação estequiométrica aplicada, é apresentado no Apêndice B.

Após a conversão dos elementos para óxidos, foi calculado o somatório TREO+Y, correspondente à soma dos óxidos de terras raras disponíveis no banco geoquímico acrescida

do óxido de ítrio. Esse parâmetro representa o conteúdo total de óxidos de terras raras mais ítrio em cada amostra. O cálculo foi realizado conforme a expressão (4):

$$\mathbf{TREO+Y = La_2O_3 + CeO_2 + Pr_6O_{11} + Nd_2O_3 + Sm_2O_3 + Eu_2O_3 + Gd_2O_3 + Tb_4O_7 + Dy_2O_3 + Ho_2O_3 + Er_2O_3 + Tm_2O_3 + Yb_2O_3 + Lu_2O_3 + Y_2O_3} \quad \mathbf{(4)}$$

Também foi calculado o somatório dos óxidos de terras raras magnéticas, denominado MREO. Neste trabalho, o MREO foi definido como a soma dos óxidos de praseodímio, neodímio, disprósio e térbio, conforme a expressão (5):

$$\mathbf{MREO = Pr_6O_{11} + Nd_2O_3 + Dy_2O_3 + Tb_4O_7} \quad \mathbf{(5)}$$

A seleção das variáveis avaliadas no QA/QC considerou a relevância geoquímica e exploratória para o PTRP. Os óxidos Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7 foram selecionados por representarem os principais óxidos de terras raras magnéticas. O TREO+Y foi incluído como parâmetro geoquímico integrador, por representar o conteúdo total dos óxidos de terras raras disponíveis no banco, acrescido de Y_2O_3. Sua utilização permitiu avaliar se a assinatura global de ETR+Y foi reproduzida entre as amostras originais e suas duplicatas. Esse somatório complementa o MREO, que representa especificamente a fração formada pelos óxidos de Pr, Nd, Dy e Tb, possibilitando avaliar tanto o conjunto total dos elementos terras raras quanto a parcela de maior interesse tecnológico. Os óxidos TiO_2 e P_2O_5 também foram incluídos como variáveis litogeoquímicas complementares, por serem óxidos maiores reportados diretamente pelo laboratório e por auxiliarem na avaliação da reprodutibilidade de componentes associados ao contexto litológico e mineralógico da área estudada.

A base geoquímica original recebida da SGS é apresentada no Apêndice C. A base tratada, contendo os elementos terras raras convertidos para óxidos, bem como os somatórios MREO e TREO+Y, é apresentada no Apêndice D.

Em seguida, foi elaborada a tabela final contendo somente os pares original–duplicata utilizados na avaliação de QA/QC. Para cada par, foram mantidas as informações de empresa responsável pelo controle de qualidade, código do par, furo, intervalo, amostra original, amostra duplicata e valores analíticos correspondentes. Essa tabela foi estruturada no formato original versus duplicata, permitindo a comparação direta entre os resultados obtidos para cada variável selecionada. A tabela dos pares original–duplicata utilizados na análise de QA/QC é apresentada no Apêndice E.

Após a organização, padronização, conversão dos elementos para óxidos, cálculo dos somatórios e estruturação dos pares original–duplicata, a tabela tratada foi utilizada como base para a etapa de avaliação da qualidade analítica apresentada no Capítulo 4. A síntese das principais etapas realizadas no tratamento dos dados geoquímicos é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais etapas do tratamento dos dados geoquímicos.

Etapa	Procedimento realizado	Produto obtido
Organização inicial	Reunião dos dados geoquímicos em planilha eletrônica	Banco geoquímico inicial
Rastreabilidade	Associação entre código da amostra, furo, intervalo e área ANM	Base vinculada ao contexto de amostragem
Padronização das unidades	Organização dos óxidos maiores em % e elementos-traço/ETR em ppm	Dados compatíveis para tratamento
Tratamento de símbolos	Remoção do símbolo "<", mantendo o valor numérico informado	Dados aptos a cálculos numéricos
Conversão dos ETR	Conversão dos elementos terras raras para seus respectivos óxidos	Óxidos de terras raras em ppm
Cálculo de TREO+Y	Soma dos óxidos de terras raras e Y_2O_3	Teor total de óxidos de terras raras mais ítrio
Cálculo de MREO	Soma de Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7	Teor de óxidos de terras raras magnéticas
Seleção dos analitos	Seleção de TREO+Y, MREO, Nd_2O_3, Pr_6O_{11}, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5	Conjunto final de variáveis QA/QC
Organização dos pares	Associação entre amostra original e sua duplicata correspondente	Base final para avaliação de QA/QC

Fonte: Elaborado pela autora com base no banco geoquímico tratado do PTRP.

Após essa etapa, a base tratada foi utilizada para a avaliação da qualidade dos dados analíticos, apresentada no Capítulo 4. Nesse capítulo são discutidos os diagramas de dispersão, os valores de diferença percentual relativa, os pares com maior discrepância, a avaliação de *bias* e a comparação entre duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais.

3.11 Análise estatística descritiva inicial

A análise estatística descritiva inicial foi realizada com o objetivo de caracterizar o comportamento geral das variáveis utilizadas na avaliação de QA/QC antes da comparação direta entre amostras originais e duplicatas. Essa etapa permite observar a amplitude dos teores, os valores centrais e a dispersão dos dados, fornecendo uma base preliminar para a interpretação dos diagramas de dispersão, dos valores de RPD e da análise de *bias* apresentados no Capítulo 4.

Foram consideradas as variáveis Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, MREO, TREO+Y, TiO_2 e P_2O_5. Para evitar a mistura entre controles de naturezas distintas, a estatística descritiva foi organizada separadamente para os pares associados às duplicatas de campo RAD e para os pares associados às duplicatas laboratoriais SGS. Dessa forma, os dados RAD correspondem a 15 pares original–duplicata, totalizando 30 registros por variável, enquanto os dados SGS correspondem a 13 pares original–duplicata, totalizando 26 registros por variável.

Para cada variável, foram calculados o número de registros, o valor mínimo, o valor máximo, a média, a mediana, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Essas medidas foram utilizadas como estatística descritiva inicial, com o objetivo de caracterizar a amplitude, a tendência central e a dispersão dos dados antes da avaliação de concordância entre amostras originais e duplicatas. A média e a mediana foram utilizadas como medidas de tendência central, enquanto o mínimo, o máximo, o desvio padrão e o coeficiente de variação auxiliaram na avaliação da amplitude e da variabilidade dos dados (Miller; Miller; Miller, 2018; Montgomery; Runger, 2018).

O coeficiente de variação (CV), também denominado desvio padrão relativo, expressa a dispersão dos dados em relação à média, permitindo comparar a variabilidade entre variáveis com diferentes magnitudes ou unidades. Neste trabalho, o CV foi calculado pela razão entre o desvio padrão e a média, multiplicada por 100, conforme a expressão:

$$\textbf{CV (\%) = (Desvio padrão / Média) × 100} \qquad \textbf{(7)}$$

Em dados geoquímicos, a dispersão estatística deve ser interpretada em conjunto com o contexto geológico, pois pode refletir variações naturais do material amostrado, diferenças litológicas, background geoquímico, presença de anomalias e também incertezas introduzidas nas etapas de amostragem, preparação e análise (Reimann; Filzmoser; Garrett, 2005; Geboy; Engle, 2011). Dessa forma, os valores de desvio padrão e CV apresentados nesta seção não

indicam, isoladamente, problema analítico, mas caracterizam a variabilidade inicial do conjunto de dados utilizado na avaliação de QA/QC.

Tabela 6 - Estatística descritiva inicial das variáveis utilizadas na avaliação de QA/QC – dados RAD.

Variável	**Unidade**	**n**	**Mínimo**	**Máximo**	**Média**	**Mediana**	**Desvio padrão**	**CV (%)**
Pr_6O_{11}	ppm	30	10,80	177,39	61,66	54,88	41,31	67,00
Nd_2O_3	ppm	30	42,34	660,18	218,11	197,59	150,12	68,83
Dy_2O_3	ppm	30	4,30	25,69	13,24	12,44	5,46	41,21
Tb_4O_7	ppm	30	0,73	4,66	2,62	2,40	1,13	43,15
MREO	ppm, óxidos	30	59,26	860,72	295,63	267,05	196,39	66,43
TREO+Y	ppm, óxidos	30	255,76	3110,71	1289,78	1185,97	775,83	60,15
TiO_2	%	30	1,23	11,23	5,31	4,79	2,22	41,88
P_2O_5	%	30	0,31	4,11	1,54	1,28	0,91	59,17

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata RAD do banco geoquímico tratado do PTRP.

Tabela 7 -Estatística descritiva inicial das variáveis utilizadas na avaliação de QA/QC – dados SGS.

Variável	Unidade	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	CV (%)
Pr_6O_{11}	ppm	26	12,79	85,27	47,36	42,63	20,03	42,29
Nd_2O_3	ppm	26	64,62	305,36	169,86	161,14	70,52	41,52
Dy_2O_3	ppm	26	7,52	23,34	12,59	12,35	3,60	28,59
Tb_4O_7	ppm	26	1,35	4,48	2,45	2,29	0,75	30,42
MREO	ppm, óxidos	26	86,57	418,46	232,27	216,64	94,06	40,50
TREO+Y	ppm, óxidos	26	422,61	1778,92	1014,36	1014,36	368,46	36,32
TiO_2	%	26	4,14	8,09	5,55	5,30	1,14	20,53
P_2O_5	%	26	0,52	2,73	1,73	1,67	0,70	40,70

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata SGS do banco geoquímico tratado do PTRP.

Os resultados mostram que o conjunto RAD apresenta maior amplitude e maior dispersão relativa para a maior parte das variáveis analisadas. Nos dados RAD, os coeficientes de variação foram superiores a 60% para Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, MREO e TREO+Y, além de 59,17% para P_2O_5. Esse comportamento indica elevada variabilidade relativa nos pares associados às duplicatas de campo, especialmente nos óxidos de terras raras de maior magnitude analítica e nos somatórios utilizados na avaliação do projeto.

Nos dados SGS, os coeficientes de variação foram menores em comparação ao conjunto RAD para todos os analitos avaliados. As reduções mais evidentes ocorrem em TREO+Y, que apresentou CV de 36,32% no conjunto SGS contra 60,15% no conjunto RAD, e em TiO_2, com CV de 20,53% no conjunto SGS contra 41,88% no conjunto RAD. Esse comportamento indica menor dispersão relativa no conjunto de duplicatas laboratoriais, compatível com a natureza desse tipo de controle, mais associado à repetibilidade da preparação e/ou análise em laboratório.

A comparação entre as Tabelas 6 e 7 não deve ser interpretada como avaliação direta de concordância entre original e duplicata, pois essa etapa é realizada posteriormente por meio dos diagramas de dispersão, do RPD e da análise de bias. Neste item, a estatística descritiva tem função preliminar, permitindo reconhecer a faixa de variação dos dados utilizados no QA/QC e justificar a necessidade de avaliar separadamente duplicatas de campo RAD e duplicatas laboratoriais SGS. Essa separação é coerente com a abordagem de controle de qualidade em exploração mineral, na qual

diferentes tipos de duplicatas representam diferentes fontes de variação ao longo do fluxo de amostragem, preparação e análise.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Organização dos pares QA/QC

Após o tratamento e a padronização da base geoquímica, foram organizados os pares originais–duplicata utilizados na avaliação de QA/QC do PTRP. Essa etapa teve como objetivo estruturar os dados em formato comparável, preservando a rastreabilidade entre o resultado da amostra original e o resultado da duplicata correspondente.

A base utilizada neste capítulo foi extraída da planilha de dados tratados, apresentada no Apêndice E, e contém somente os pares selecionados para a análise de QA/QC. Para cada par, foram mantidas as informações de empresa responsável pelo controle de qualidade, tipo de duplicata, furo, intervalo amostrado, código da amostra original, código da amostra duplicata, analito, unidade, valor original e valor duplicado.

Foram considerados pares de duplicatas de campo inseridas pela RAD e duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS. As duplicatas de campo permitem avaliar a variabilidade combinada associada à coleta, à homogeneização, à divisão da amostra, à preparação inicial e à representatividade do material amostrado. As duplicatas laboratoriais, por sua vez, permitem avaliar predominantemente a repetibilidade das etapas de preparação e análise realizadas em condições mais controladas de laboratório (Piercey, 2014; Abzalov, 2016; Smee et al., 2024).

Os analitos selecionados para a avaliação foram TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5. Esses parâmetros foram escolhidos por representarem os principais óxidos de interesse do trabalho: os óxidos individuais de terras raras magnéticas, os somatórios geoquímicos utilizados no projeto e os óxidos maiores associados ao contexto litogeoquímico da área.

A organização dos dados em pares permitiu a comparação direta entre os valores originais e duplicados para cada analito selecionado. Essa estrutura serviu de base para as análises apresentadas nas seções seguintes, incluindo os diagramas de dispersão original versus duplicata, o cálculo da diferença percentual relativa, a identificação dos pares com maior discrepância e a avaliação de possíveis tendências de viés.

4.1.1 Distribuição espacial dos controles QA/QC e contexto geológico-geofísico

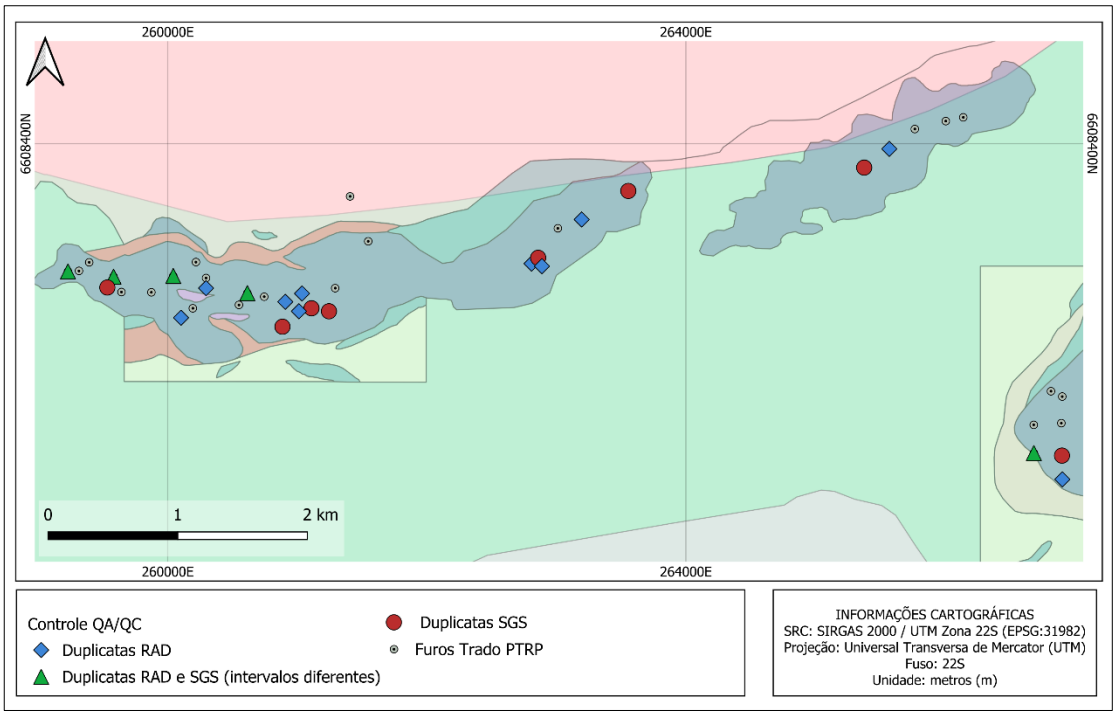
Além da organização tabular dos pares original–duplicata, foi realizada a espacialização dos furos com controle QA/QC, com o objetivo de verificar a distribuição dos pares RAD e

SGS em relação ao conjunto total de furos de trado do PTRP. Essa etapa permite relacionar a avaliação estatística das duplicatas ao contexto espacial da área, considerando a posição dos furos em relação às unidades litológicas e às respostas geofísicas previamente apresentadas no Capítulo 3. A integração entre localização, litologia, tipo de duplicata e resposta analítica é importante porque programas de QA/QC devem acompanhar todas as etapas da cadeia de amostragem, preparação, análise e gerenciamento dos dados, e não apenas o resultado laboratorial final (Smee *et al*., 2024).

De forma descritiva, os furos de trado distribuem-se em três porções principais da área investigada. A primeira corresponde à porção centro-oeste, onde se concentra a maior parte dos furos e também parte significativa dos controles QA/QC. A segunda corresponde à porção nordeste, onde há menor densidade de furos. A terceira corresponde à porção sudeste da área, onde ocorre outro conjunto de furos mais afastado do agrupamento principal. Essa divisão tem finalidade apenas locacional, auxiliando a leitura dos mapas, e não corresponde à definição de domínios geoquímicos ou litológicos formais.

A Figura 9 apresenta a localização dos furos com controle QA/QC sobre a geologia local da área. Os furos sem duplicatas foram mantidos como base espacial, enquanto os furos com duplicatas foram destacados conforme o tipo de controle disponível: duplicatas de campo RAD, duplicatas laboratoriais SGS e furos com ambos os controles em intervalos distintos. A legenda completa das unidades litológicas foi apresentada no Capítulo 3; nesta seção, a base geológica é utilizada apenas para contextualizar espacialmente os controles QA/QC.

Figura 9 - Distribuição espacial dos furos com controle QA/QC sobre a geologia local do PTRP.



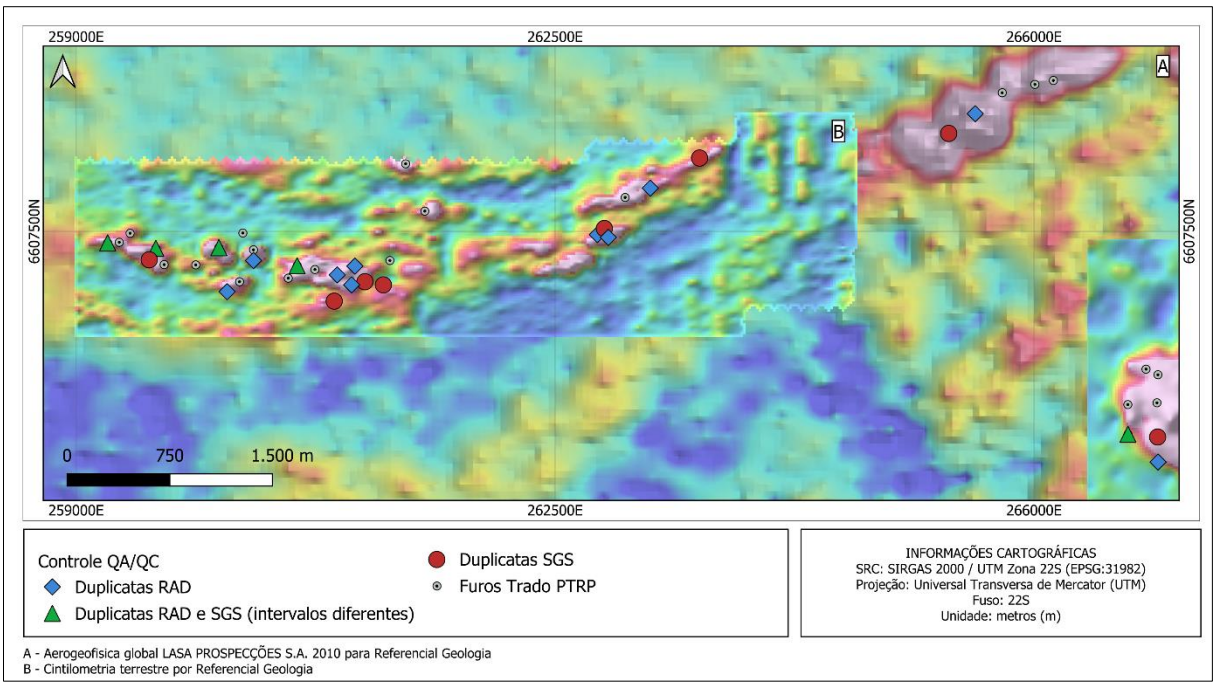
Fonte: Elaborado pela autora.

Todos os furos que possuem duplicatas estão associados à unidade titanita-hornblendito. Essa observação é importante porque indica que a avaliação de repetibilidade e reprodutibilidade realizada neste trabalho está concentrada em uma mesma unidade litológica principal, reduzindo a comparação entre materiais pertencentes a unidades geológicas muito distintas. Entretanto, alguns furos ocorrem próximos a contatos litológicos, o que deve ser considerado na interpretação espacial. Os furos AUGTR_0004, AUGTR_0007 e AUGTR_0027 ocorrem na borda ou próximos da unidade titanita-hornblendito. Essa observação é relevante porque Abzalov (2016) destaca que duplicatas devem representar adequadamente a variabilidade do depósito, incluindo diferentes faixas de teor, tipos de mineralização, unidades geológicas e distribuição espacial.

A Figura 10 apresenta a localização dos mesmos controles QA/QC sobre a base geofísica aérea e terrestre. A aeroradiometria de Th fornece uma leitura regional da distribuição dos radioelementos em superfície, enquanto a cintilometria terrestre em CPS apresenta maior detalhamento local. Em levantamentos gamaespectrométricos, as respostas radiométricas estão associadas principalmente à distribuição superficial dos radioelementos naturais, como K, U e Th, sendo úteis como apoio ao mapeamento geológico e à identificação de contrastes entre materiais superficiais (Minty, 1997). Entretanto, dados geofísicos devem ser interpretados de

forma integrada ao contexto geológico, pois anomalias representam contrastes físicos ou geoquímicos e não constituem, isoladamente, uma interpretação geológica definitiva (Dentith; Mudge, 2014).

Figura 10 - Distribuição espacial dos furos com controle QA/QC sobre a resposta geofísica aérea e terrestre do PTRP.



Fonte: Elaborado pela autora.

A sobreposição dos furos com duplicatas à geofísica mostra que parte dos controles QA/QC ocorre em bordas de anomalias terrestres. Entre os furos localizados em bordas de resposta geofísica terrestre destacam-se AUGTR_0004, AUGTR_0007, AUGTR_0013, AUGTR_0014, AUGTR_0017, AUGTR_0020, AUGTR_0022, AUGTR_0023, AUGTR_0027, AUGTR_0030 e AUGTR_0034. A sobreposição dos furos com duplicatas aos dados geofísicos mostra que parte dos controles QA/QC ocorre em bordas de anomalias terrestres. Dentith e Mudge (2014) afirmam que “as medições geofísicas respondem a mudanças nas propriedades físicas da subsuperfície”. Os autores também observam que feições lineares, zonas de maior complexidade estrutural ou áreas de gradientes pronunciados “geralmente coincidem com contatos e/ou falhas ou zonas de cisalhamento” (Dentith; Mudge, 2014). Dessa forma, a posição desses furos em zonas de transição da resposta geofísica pode indicar contrastes laterais nas propriedades do material superficial ou proximidade de contatos geológicos. Essa relação foi considerada apenas como informação contextual, pois a resposta geofísica, isoladamente, não permite determinar a natureza ou a causa do contraste observado

Do ponto de vista do QA/QC, essa espacialização também é importante porque as duplicatas de campo e laboratoriais representam etapas distintas do controle de qualidade. Segundo Smee *et al*. (2024), as duplicatas geradas em diferentes estágios da amostragem e preparação permitem estimar a precisão associada a cada etapa, sendo que a maior fonte de incerteza geralmente está relacionada à coleta inicial da amostra. Dessa forma, as duplicatas de campo RAD tendem a incorporar maior influência da coleta, homogeneização e representatividade do material, enquanto as duplicatas laboratoriais SGS refletem de forma mais direta a repetição analítica em condições controladas.

Assim, os mapas de localização das duplicatas foram utilizados como etapa de apoio à interpretação dos resultados de QA/QC. A posição dos furos em bordas litológicas ou geofísicas não foi tratada como causa direta das diferenças entre original e duplicata, mas como fator contextual a ser considerado em conjunto com os diagramas de dispersão, os valores de RPD, os pares com RPD superior a 20% e a análise de bias.

4.2 Critérios de avaliação dos pares original–duplicata

A avaliação dos pares original–duplicata foi realizada por meio da integração entre critérios gráficos e estatísticos, com o objetivo de verificar a concordância entre os resultados analíticos das amostras originais e de suas respectivas duplicatas. Essa abordagem permite avaliar a precisão, a repetibilidade e a reprodutibilidade dos dados geoquímicos, além de reconhecer possíveis dispersões, tendências de viés e pares com maior discrepância relativa. A avaliação integrada de dados pareados é recomendada em programas de QA/QC, pois evita que a qualidade dos dados seja interpretada a partir de um único indicador estatístico (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee *et al*., 2024).

Neste trabalho, os pares foram avaliados considerando os analitos TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5. Para cada analito, os valores das amostras originais foram comparados diretamente com os valores das duplicatas correspondentes. Essa comparação foi aplicada separadamente para as duplicatas de campo inseridas pela RAD e para as duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS, uma vez que esses dois tipos de controle representam etapas distintas do fluxo de geração do dado geoquímico.

O primeiro critério utilizado foi a elaboração de diagramas de dispersão original versus duplicata. Nesses gráficos, o valor da amostra original foi representado no eixo X, enquanto o

valor da duplicata correspondente foi representado no eixo Y. A reta X=Y foi utilizada como referência de concordância ideal entre os pares, indicando a condição em que o valor da duplicata é igual ao valor da amostra original. Dessa forma, quanto mais próximos os pontos estiverem da reta X=Y, maior é a concordância entre original e duplicata. Pontos afastados dessa reta indicam maior diferença entre os resultados pareados e, portanto, necessidade de avaliação conjunta com os demais critérios.

Além da reta X=Y, foram utilizadas faixas auxiliares de variação de ±5%, ±10% e ±20%. Essas faixas funcionam como referência visual para avaliar o grau de dispersão dos pares em relação à condição ideal. A faixa de ±5% foi adotada como referência de excelente concordância ou alta precisão; a faixa de ±10% como indicativo de boa concordância; e a faixa de ±20% como limite de atenção para identificação de pares que exigem avaliação individual. Esses limites não foram tratados como critérios universais de aprovação ou reprovação dos dados, mas como faixas práticas de triagem gráfica e quantitativa, considerando que a precisão esperada depende do tipo de duplicata, da matriz analisada, da concentração do elemento, do limite de quantificação e da heterogeneidade natural do material (Abzalov, 2016; Piercey, 2014).

A adoção da faixa de ±5% não substituiu os limites de ±10% e ±20%, mas permitiu diferenciar os pares com excelente concordância daqueles que, embora ainda satisfatórios, apresentaram maior dispersão. Essa distinção é especialmente importante para as duplicatas laboratoriais, nas quais se espera menor variabilidade por representarem principalmente a repetibilidade da preparação e/ou análise em laboratório. Por outro lado, as duplicatas de campo podem apresentar dispersão mais elevada, pois incorporam variabilidade associada à coleta, homogeneização, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado. Assim, os pares RAD e SGS foram interpretados separadamente, sem que o bom desempenho das duplicatas laboratoriais ocultasse a variabilidade observada nas duplicatas de campo. Os critérios interpretativos adotados neste trabalho são sintetizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Critérios adotados para avaliação dos pares original–duplicata.

Faixa de variação / RPD	Classe interpretativa	Significado adotado no trabalho
≤ 5%	Excelente concordância	Alta precisão entre original e duplicata.
> 5% e ≤ 10%	Boa concordância	Diferença baixa entre os pares, considerada satisfatória.
> 10% e ≤ 20%	Faixa de atenção	Variação moderada, exigindo observação do contexto do par.
> 20%	Revisão individual	Par com maior discrepância relativa, devendo ser avaliado individualmente.

Fonte: Elaborado pela autora com base em Abzalov (2016), Piercey (2014), Stanley e Lawie (2007) e Smee *et al*. (2024).

A avaliação quantitativa dos pares foi realizada por meio da diferença percentual relativa, ou RPD (*Relative Percent Difference*), métrica utilizada para expressar a diferença relativa entre dois resultados analíticos pareados. O RPD foi utilizado por permitir a comparação direta entre a amostra original e sua duplicata, independentemente da unidade do analito analisado. Neste trabalho, o RPD foi calculado conforme a expressão 8.

$$\mathbf{RDP\ (\%) = (Duplicata - Original) / ((Original + Duplicata) / 2) \times 100} \qquad \mathbf{(8)}$$

Em que original corresponde ao teor obtido na amostra original e duplicata corresponde ao teor obtido na amostra duplicada correspondente. Valores baixos de RPD indicam maior proximidade entre original e duplicata, enquanto valores elevados indicam maior dispersão entre os pares. A interpretação do RPD foi realizada em conjunto com os diagramas de dispersão, com a posição dos pontos em relação à reta X=Y, com as faixas de ±5%, ±10% e ±20% e com o comportamento geral dos pares por tipo de duplicata.

A aplicação do RPD exige cautela em concentrações próximas ao limite de detecção ou ao limite de quantificação, pois pequenas diferenças absolutas podem resultar em valores percentuais relativamente elevados. Por esse motivo, pares com RPD superior a 20% não foram automaticamente descartados. Esses pares foram classificados como casos de revisão

individual, sendo avaliados posteriormente em função do analito, do tipo de duplicata, do furo, do intervalo amostrado e do contexto geológico-geofísico apresentado na seção anterior.

A correlação entre original e duplicata também foi avaliada por meio do coeficiente de determinação, R^2. Esse coeficiente indica o grau de ajuste dos pontos a uma relação linear entre os valores originais e duplicados. Valores de R^2 próximos de 1 indicam forte relação linear entre os pares; entretanto, esse parâmetro não deve ser interpretado isoladamente. Um conjunto de dados pode apresentar R^2 elevado e, ainda assim, estar sistematicamente deslocado em relação à reta X=Y, indicando possível viés proporcional ou deslocamento sistemático entre original e duplicata. Por isso, o R^2 foi utilizado apenas como critério complementar, em associação com o RPD, as faixas auxiliares de variação e a análise visual dos diagramas de dispersão.

Além do RPD e do R^2, também foi avaliada a diferença entre duplicata e original, utilizada como apoio à identificação de possíveis tendências de viés. Para cada par, a diferença foi calculada conforme a Expressão 9.

$$\textbf{Diferença} = \textbf{Duplicata} - \textbf{Original} \quad (9)$$

Valores positivos indicam que a duplicata apresentou teor superior ao da amostra original, enquanto valores negativos indicam teor inferior ao da amostra original. Essa avaliação permite reconhecer se os desvios ocorrem de forma aleatória, com valores positivos e negativos distribuídos sem tendência definida, ou se há predomínio sistemático de duplicatas maiores ou menores que os respectivos valores originais.

Para complementar a análise de viés, também foi considerada a média de cada par original–duplicata, calculada conforme a Expressão 10.

$$\textbf{Média do par} = (\textbf{Original} + \textbf{Duplicata}) / 2 \quad (10)$$

A relação entre a diferença e a média do par foi utilizada para verificar se a dispersão aumenta em determinados intervalos de teor, ou se os desvios ocorrem de forma semelhante ao longo da faixa de concentração dos analitos. Essa abordagem auxilia na distinção entre diferenças pontuais, possíveis efeitos de concentração e tendências sistemáticas entre original e duplicata.

A interpretação dos pares também considerou a diferença entre duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais. As duplicatas de campo inseridas pela RAD foram interpretadas como

controles associados à variabilidade da amostragem, pois incorporam efeitos da coleta, homogeneização, quarteamento, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado. Em materiais como solos, regolitos e amostras de trado, essa variabilidade pode ser mais expressiva, especialmente quando os elementos de interesse estão associados a minerais acessórios ou fases de distribuição heterogênea. As duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS foram interpretadas como controles mais diretamente relacionados à repetibilidade da preparação e da análise laboratorial, sendo esperado comportamento mais próximo da reta X=Y e menor dispersão relativa (Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee *et al*., 2024).

Com isso a avaliação dos pares original–duplicata foi baseada na leitura integrada dos seguintes critérios: posição dos pontos em relação à reta X=Y; dispersão em relação às faixas de ±5%, ±10% e ±20%; valores de RPD; comportamento da linha de tendência; coeficiente R^2; diferença entre duplicata e original; média do par; identificação de possíveis tendências de viés; distinção entre duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais; e identificação dos pares com RPD superior a 20%. A síntese dos valores de RPD por analito e tipo de duplicata é apresentada posteriormente na Tabela 7, enquanto os pares com RPD superior a 20% são avaliados individualmente na seção 4.4.1.

Essa abordagem integrada permite avaliar a qualidade dos dados geoquímicos sem reduzir a interpretação a um único limite numérico. No contexto deste trabalho, o limite de 5% foi utilizado para reconhecer pares de excelente concordância; o limite de 10% para indicar boa concordância; o limite de 20% como faixa de atenção; e os valores superiores a 20% como indicativos de pares que exigem revisão individual. Assim, a metodologia adotada permite destacar a boa repetibilidade das duplicatas laboratoriais quando presente, sem ocultar a maior variabilidade das duplicatas de campo.

4.3 Avaliação gráfica dos pares original–duplicata

Com base nos critérios definidos na seção 4.2, a avaliação gráfica dos pares original–duplicata foi realizada por meio de diagramas de dispersão, considerando a posição dos pontos em relação à reta X=Y e aos envelopes auxiliares de variação relativa de ±5%, ±10% e ±20%. Esses envelopes foram utilizados como apoio visual para classificar os pares conforme as faixas interpretativas apresentadas no Quadro 4 excelente concordância, boa concordância, faixa de atenção e revisão individual.

A interpretação dos diagramas foi realizada em conjunto com os valores de RPD, calculados conforme a Espressão 1, de modo a integrar a leitura visual dos gráficos com uma medida quantitativa de diferença relativa entre original e duplicata. Essa abordagem é recomendada na avaliação de dados pareados de QA/QC, pois permite reconhecer dispersão, afastamentos em relação à reta de concordância e possíveis tendências de viés ao longo da faixa de teores analisada (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee *et al*., 2024).

A análise gráfica foi conduzida separadamente para as duplicatas de campo inseridas pela RAD e para as duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS. Essa separação é necessária porque os dois grupos representam etapas distintas do fluxo de geração do dado geoquímico. As duplicatas de campo tendem a incorporar maior variabilidade associada à coleta, homogeneização, quarteamento, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado, enquanto as duplicatas laboratoriais refletem de forma mais direta a repetibilidade da preparação e da análise em laboratório (Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee *et al*., 2024).

Inicialmente, foram avaliados diagramas gerais de concordância para os pares RAD e SGS, considerando conjuntamente os analitos TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5. Em seguida, os resultados foram analisados por somatório e por analito, permitindo identificar quais variáveis apresentaram maior ou menor dispersão entre original e duplicata. Dessa forma, a avaliação gráfica permitiu comparar o comportamento global dos pares e, posteriormente, detalhar a resposta específica de cada variável geoquímica.

4.3.1 Diagramas gerais de concordância original versus duplicata

Os diagramas gerais de concordância original versus duplicata foram elaborados separadamente para as duplicatas de campo inseridas pela RAD e para as duplicatas laboratoriais inseridas pela SGS. Em ambos os casos, foram considerados os analitos TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5. Nesta etapa, a avaliação foi essencialmente gráfica e teve como objetivo verificar o comportamento geral dos pares em relação à reta X=Y e aos envelopes auxiliares de variação relativa de ±5%, ±10% e ±20%.

A reta X=Y representa a condição ideal de concordância entre original e duplicata, na qual os dois valores são iguais. Os envelopes de ±5%, ±10% e ±20% foram utilizados como referência visual para reconhecer diferentes níveis de afastamento em relação à condição ideal, conforme os critérios definidos na seção 4.2. Essa abordagem é recomendada em avaliações de

QA/QC porque permite observar dispersão, afastamentos em relação à reta de concordância e possíveis tendências sistemáticas entre pares originais–duplicata (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee *et al*., 2024).

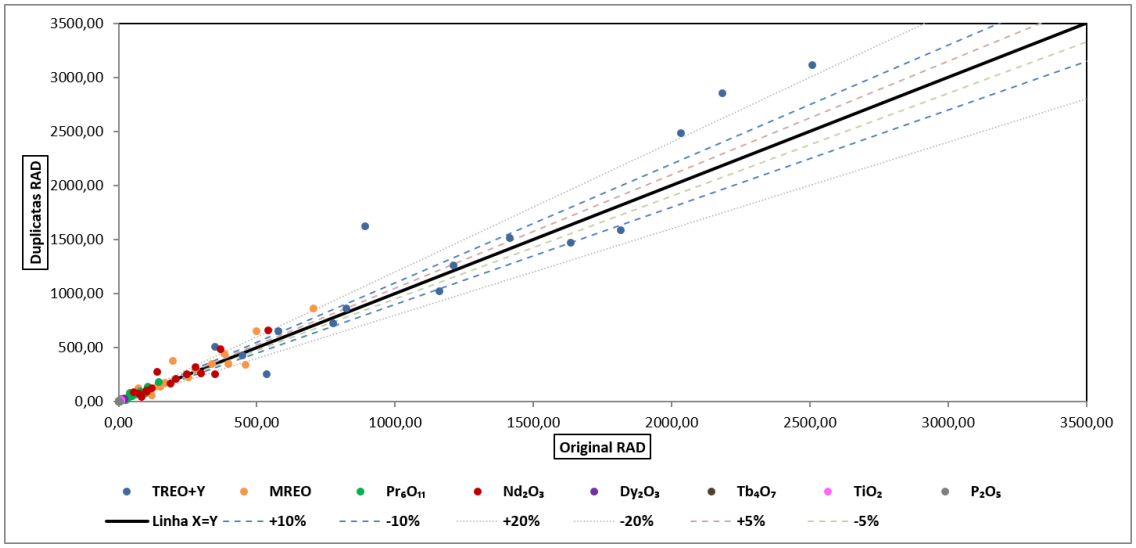
Além da análise visual, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson, representado por **r**, para avaliar a associação linear entre os valores originais e duplicados. O coeficiente de Pearson varia de -1 a +1, sendo que valores próximos de +1 indicam forte associação linear positiva. Entretanto, esse coeficiente não deve ser interpretado isoladamente como medida de concordância, pois um conjunto de dados pode apresentar alta correlação e, ainda assim, estar deslocado em relação à reta X=Y. Por isso, neste trabalho, a correlação foi utilizada apenas como apoio à interpretação gráfica, em conjunto com a posição dos pontos nos envelopes de variação (Montgomery; Runger, 2018; Sinclair; Blackwell, 2002). O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado conforme a Expressão 11:

$$\mathbf{r = \Sigma[(Xi - \bar{X})(Yi - \bar{Y})] \,/\, \sqrt{\{\Sigma(Xi - \bar{X})^2 \times \Sigma(Yi - \bar{Y})^2\}}} \qquad \mathbf{(11)}$$

Em que **Xi** corresponde ao valor da amostra original, **Yi** corresponde ao valor da duplicata, $\bar{\mathbf{X}}$ corresponde à média dos valores originais e $\bar{\mathbf{Y}}$ corresponde à média dos valores duplicados.

No conjunto geral das duplicatas de campo RAD, a Figura 11a mostra que os pares apresentam tendência positiva em relação à reta X=Y, indicando associação entre os valores originais e duplicados. Entretanto, observa-se maior dispersão dos pontos, principalmente nos analitos de maior amplitude, como TREO+Y, MREO e Nd_2O_3. Essa dispersão é compatível com a natureza das duplicatas de campo, que incorporam não apenas a variabilidade analítica, mas também efeitos de coleta, homogeneização, quarteamento, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado (Abzalov, 2016; Piercey, 2014; Smee *et al*., 2024).

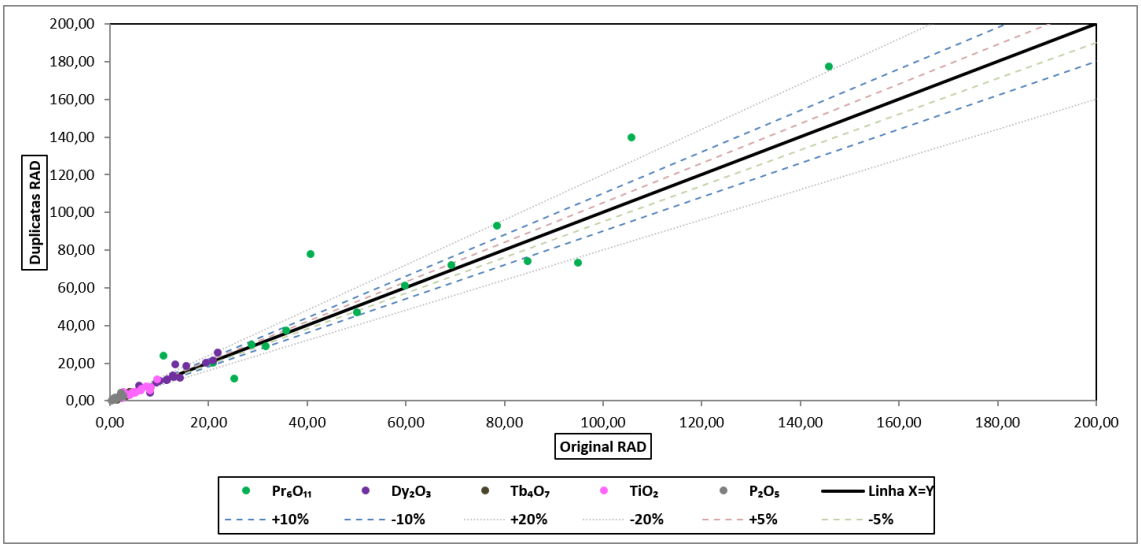
Figura 11 - Diagrama geral de concordância original versus duplicata de campo RAD para todos os analitos avaliados, com reta X=Y e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

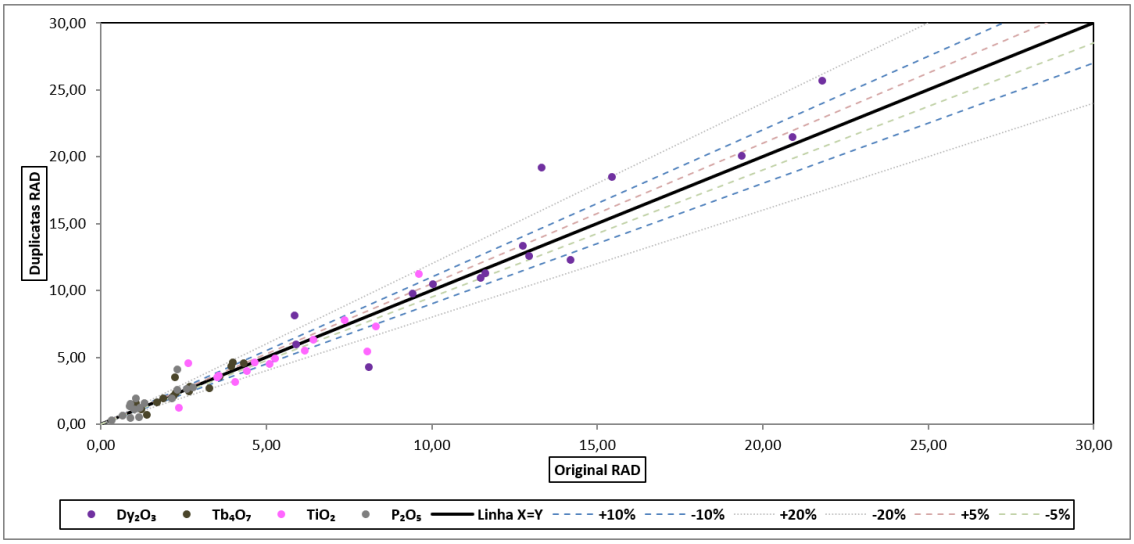
Para melhorar a visualização dos analitos de menor magnitude no conjunto RAD, foram elaborados recortes gráficos. A Figura 12 apresenta o diagrama sem TREO+Y, MREO e Nd_2O_3, permitindo observar com maior clareza o comportamento de Pr_6O_{11}, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5. A Figura 13 apresenta uma ampliação adicional, sem Pr_6O_{11}, destacando Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5. Esses recortes não representam exclusão de dados, mas apenas ajuste de escala para evitar que os analitos de maior amplitude comprimam visualmente os demais pontos próximos à origem.

Figura 12 - Recorte do diagrama geral RAD sem TREO+Y, MREO e Nd_2O_3, destacando os analitos de magnitude intermediária e menor.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

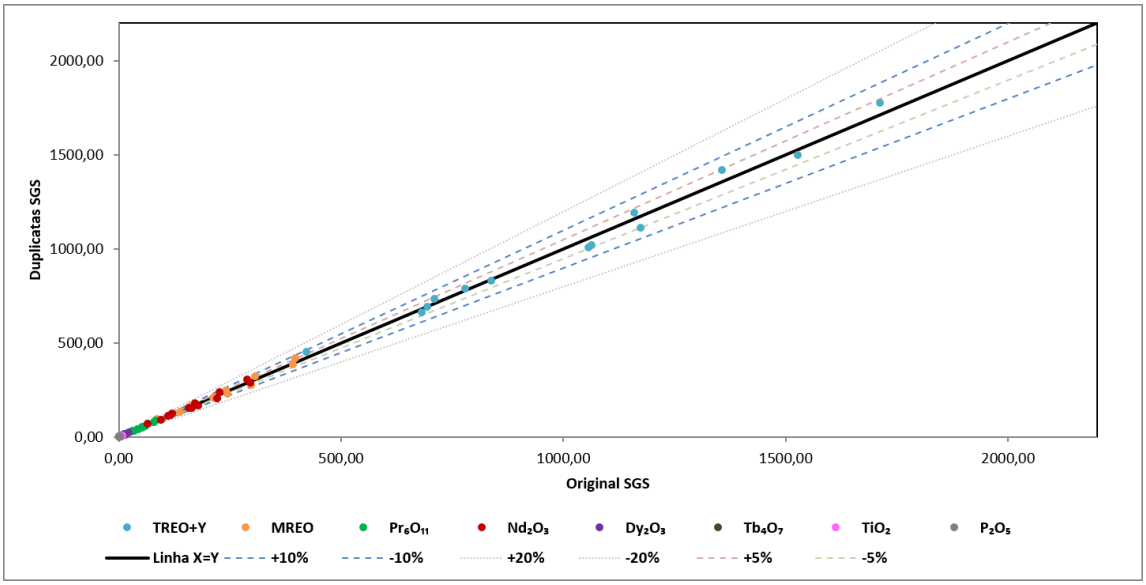
Figura 13 - Ampliação do diagrama geral RAD para Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5, com reta X=Y e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

No conjunto das duplicatas laboratoriais SGS, apresentado na Figura 14, os pontos estão mais concentrados próximos à reta X=Y e aos envelopes de menor variação, especialmente ±5% e ±10%. Esse comportamento indica maior concordância gráfica entre original e duplicata no controle laboratorial, o que é esperado para duplicatas que refletem de forma mais direta a repetibilidade da preparação e da análise em laboratório. Essa diferença entre RAD e SGS reforça a necessidade de interpretar separadamente duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais, pois elas representam etapas distintas do fluxo de geração do dado geoquímico (Abzalov, 2016; Piercey, 2014).

Figura 14 - Diagrama geral de concordância original versus duplicata laboratorial SGS para todos os analitos avaliados, com reta X=Y e envelopes auxiliares de ±5%, ±10% e ±20%.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

A Tabela 8 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson calculados para cada analito e tipo de duplicata. Observa-se que os pares SGS apresentaram correlações muito elevadas para todos os analitos, com valores superiores a 0,990. Os pares RAD também apresentaram correlações positivas elevadas, porém com valores inferiores aos da SGS, especialmente para TiO_2 e P_2O_5. Essa diferença confirma que ambos os conjuntos apresentam associação linear entre original e duplicata, mas com maior dispersão nas duplicatas de campo.

Tabela 8 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) por analito e tipo de duplicata.

Analito	r RAD	r SGS	Analito	r RAD	r SGS
TREO+Y	0,942	0,994	Dy_2O_3	0,932	0,991
MREO	0,930	0,993	Tb_4O_7	0,922	0,994
Pr_6O_{11}	0,933	0,995	TiO_2	0,888	0,992
Nd_2O_3	0,929	0,992	P_2O_5	0,837	0,995
Dy_2O_3	0,932	0,991	**Geral**	**0,979**	**0,999**

Fonte: Elaborada pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

De forma geral, os diagramas indicam que as duplicatas laboratoriais SGS apresentam maior proximidade em relação à reta X=Y e menor dispersão gráfica, enquanto as duplicatas

de campo RAD apresentam maior espalhamento dos pontos. Essa diferença não deve ser interpretada diretamente como erro da amostragem de campo, mas como reflexo da maior variabilidade incorporada por esse tipo de controle. A avaliação quantitativa dessa dispersão, por meio do RPD e da classificação dos pares por faixas de diferença relativa, é apresentada nas seções seguintes.

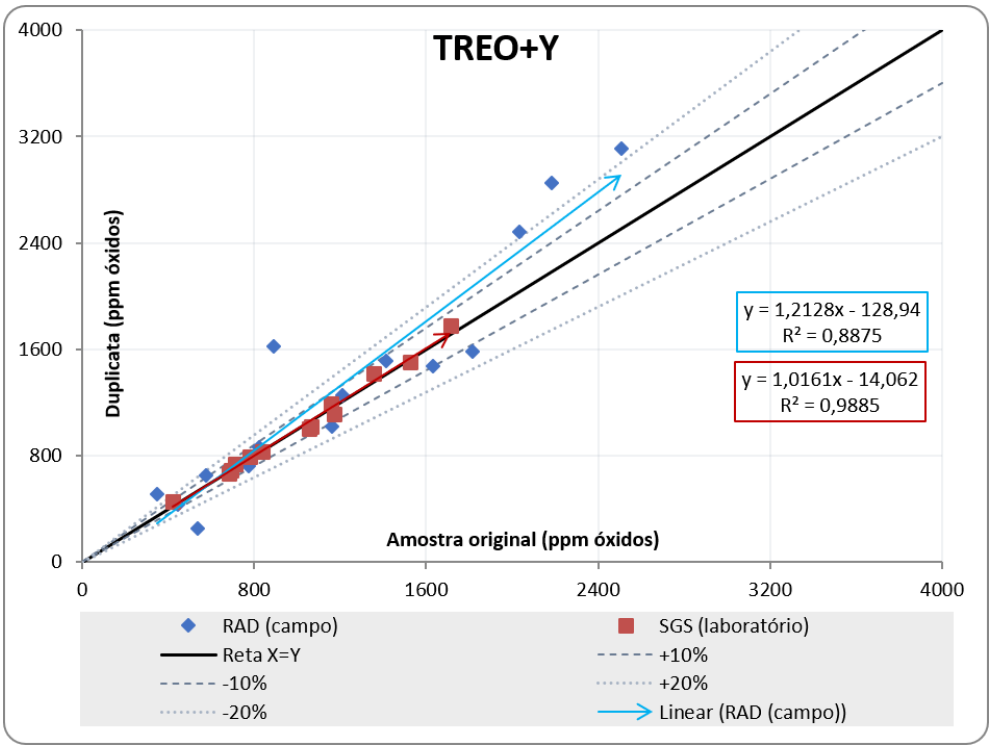
4.3.2 Diagramas de dispersão dos somatórios TREO+Y e MREO

Os somatórios TREO+Y e MREO foram avaliados inicialmente por representarem os principais parâmetros integradores deste trabalho. O TREO+Y expressa o conteúdo total de óxidos de terras raras mais ítrio, enquanto o MREO representa a soma dos óxidos de terras raras magnéticas selecionados, isto é, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7. A avaliação desses somatórios permite verificar a concordância entre original e duplicata tanto para o conjunto total de óxidos de terras raras quanto para a fração associada aos elementos magnéticos de maior interesse tecnológico.

Conforme discutido por Sinclair e Blackwell (2002), Abzalov (2016) e Smee *et al*. (2024), a avaliação de dados pareados em QA/QC deve combinar ferramentas gráficas e estatísticas, considerando a posição dos pares em relação à reta de concordância, a dispersão dos dados, o tipo de duplicata e a etapa do fluxo amostral representada por cada controle. Dessa forma, os diagramas de dispersão foram interpretados juntamente com os valores de RPD e com a classificação dos pares por faixas de diferença relativa.

No diagrama de dispersão do TREO+Y mostrado na Figura 15, observa-se que as duplicatas laboratoriais SGS apresentam forte aderência à reta X=Y, com coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}9885$. A linha de tendência da SGS apresenta inclinação próxima de 1, indicando elevada concordância entre os valores originais e duplicados. O RPD médio das duplicatas laboratoriais para TREO+Y foi de 3,30%, sem registro de pares acima do limite de 20%, evidenciando boa repetibilidade laboratorial para esse somatório.

Figura 15 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para TREO+Y.

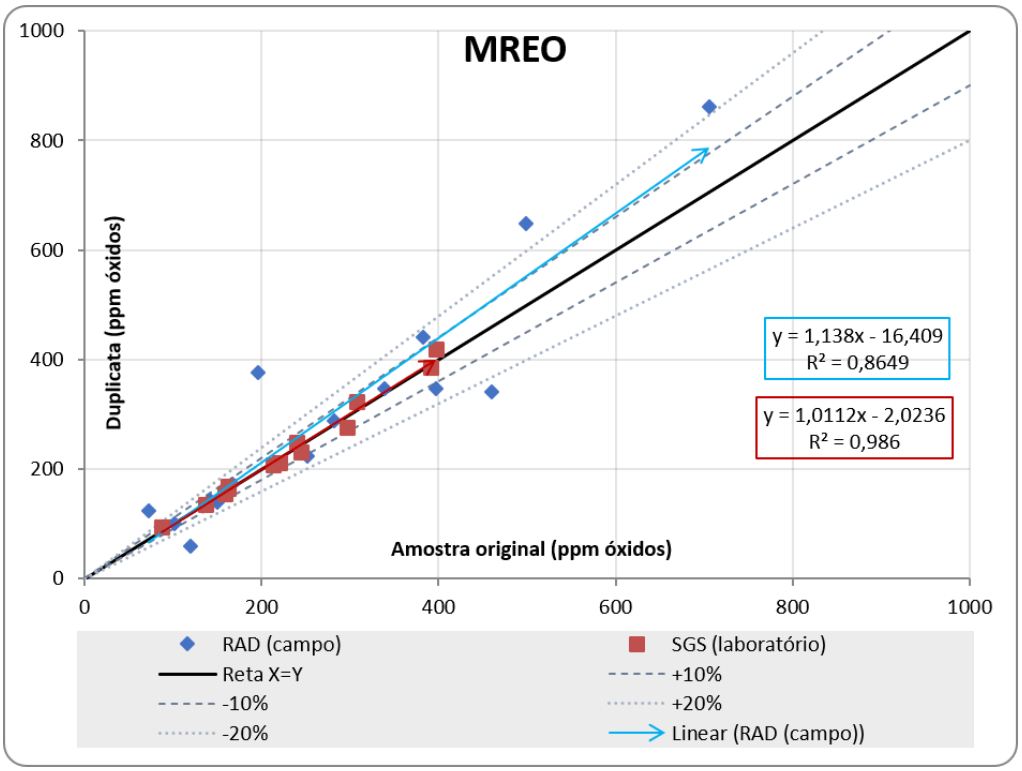


Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

As duplicatas de campo RAD também apresentam correlação positiva para TREO+Y, com R^2 = 0,8875. Entretanto, os pontos mostram maior dispersão em relação à reta X=Y, especialmente em teores mais elevados. O RPD médio das duplicatas de campo para TREO+Y foi de 20,62%, com cinco pares acima de 20%. O maior RPD foi observado no furo AUGTR_0007, intervalo 4–5 m, com RPD de 70,89%. Esse comportamento indica que, para o TREO+Y, a variabilidade mais expressiva está associada às duplicatas de campo, e não às duplicatas laboratoriais.

O MREO apresentou comportamento semelhante ao TREO+Y na Figura 16. Para as duplicatas laboratoriais SGS, o gráfico mostra boa aproximação dos pontos em relação à reta X=Y, com R^2 = 0,9860, RPD médio de 3,96% e ausência de pares acima de 20%. Esse resultado indica boa consistência laboratorial para o conjunto dos óxidos de terras raras magnéticas.

Figura 16 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para MREO.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

Nas duplicatas de campo RAD, o MREO apresentou R^2 = 0,8614, RPD médio de 21,05% e cinco pares acima de 20%. O maior RPD foi registrado no furo AUGTR_0007, intervalo 4–5 m, com RPD de 71,45%. Assim como no TREO+Y, a maior dispersão ocorre nos pares de campo, sugerindo influência da coleta, homogeneização, quarteamento, preparação inicial e representatividade do material amostrado. Essa interpretação é coerente com Abzalov (2016) e Smee *et al*. (2024), que destacam que duplicatas de campo incorporam maior número de fontes de variação do que duplicatas laboratoriais.

Para complementar a leitura visual dos diagramas, os pares originais–duplicata de TREO+Y e MREO foram classificados por faixas de RPD, considerando os intervalos ≤5%, >5–10%, >10–20% e >20% mostrados na Tabela 9. A inclusão da faixa ≤5% permite reconhecer os pares de alta concordância, enquanto as faixas de 10% e 20% mantêm a leitura gradual da dispersão já utilizada nos gráficos. Essa classificação foi adotada como critério interpretativo, e não como limite absoluto de aceitação ou rejeição dos dados, pois a variabilidade esperada depende do tipo de duplicata, da matriz amostrada, da faixa de teor e da heterogeneidade natural do material (Abzalov, 2016; Stanley; Lawie, 2007; Smee *et al*., 2024).

Tabela 9 - Distribuição dos pares original–duplicata de TREO+Y e MREO por faixas de RPD.

Analito	Tipo de duplicata	RPD ≤5%	RPD >5–10%	RPD >10–20%	RPD >20%	Total de pares
TREO+Y	RAD	3	2	5	5	15
TREO+Y	SGS	11	2	0	0	13
MREO	RAD	5	1	4	5	15
MREO	SGS	8	5	0	0	13

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A Tabela 9 apresenta a distribuição quantitativa dos pares por faixas de RPD, enquanto as Tabelas 10 e 11 identificam os furos e intervalos correspondentes a cada faixa. Essa separação permite reconhecer não apenas a frequência de pares em cada classe de concordância, mas também quais intervalos controlam a maior variabilidade observada nos somatórios TREO+Y e MREO.

Tabela 10 - Identificação dos pares original–duplicata de TREO+Y por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m	AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0023, 2–3 m	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0032, 5–6 m
>10–20%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0034, 8–9 m	Não houve pares nesta faixa
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m; AUGTR_0041, 1–2 m; AUGTR_0043, 5–6 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Tabela 11 - Identificação dos pares original–duplicata de MREO por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m	AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	AUGTR_0023, 2–3 m	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0032, 5–6 m
>10–20%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0041, 1–2 m	Não houve pares nesta faixa
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m; AUGTR_0034, 8–9 m; AUGTR_0043, 5–6 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A identificação dos pares confirma o contraste entre os controles RAD e SGS. Nas duplicatas laboratoriais SGS, os pares de TREO+Y e MREO concentram-se nas faixas de menor RPD, sem ocorrência de pares acima de 10%. Nas duplicatas de campo RAD, os pares distribuem-se em todas as faixas, incluindo cinco pares acima de 20% para ambos os somatórios. Os intervalos AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; e AUGTR_0032, 6–7 m aparecem como críticos tanto em TREO+Y quanto em MREO, indicando que a discrepância afeta simultaneamente o somatório total de óxidos de terras raras e a fração de terras raras magnéticas. Além desses, AUGTR_0043, 5–6 m também aparece acima de 20% nos dois somatórios, enquanto AUGTR_0034, 8–9 m ocorre acima de 20% no MREO e na faixa >10–20% em TREO+Y.

Dessa forma, os resultados mostram que os somatórios TREO+Y e MREO apresentam boa repetibilidade laboratorial, enquanto as maiores discrepâncias estão associadas às duplicatas de campo. A recorrência de alguns intervalos nas faixas de maior RPD indica que a

variabilidade não está distribuída de forma homogênea no conjunto RAD, mas concentrada em pares específicos, os quais serão retomados na seção 4.4.1.

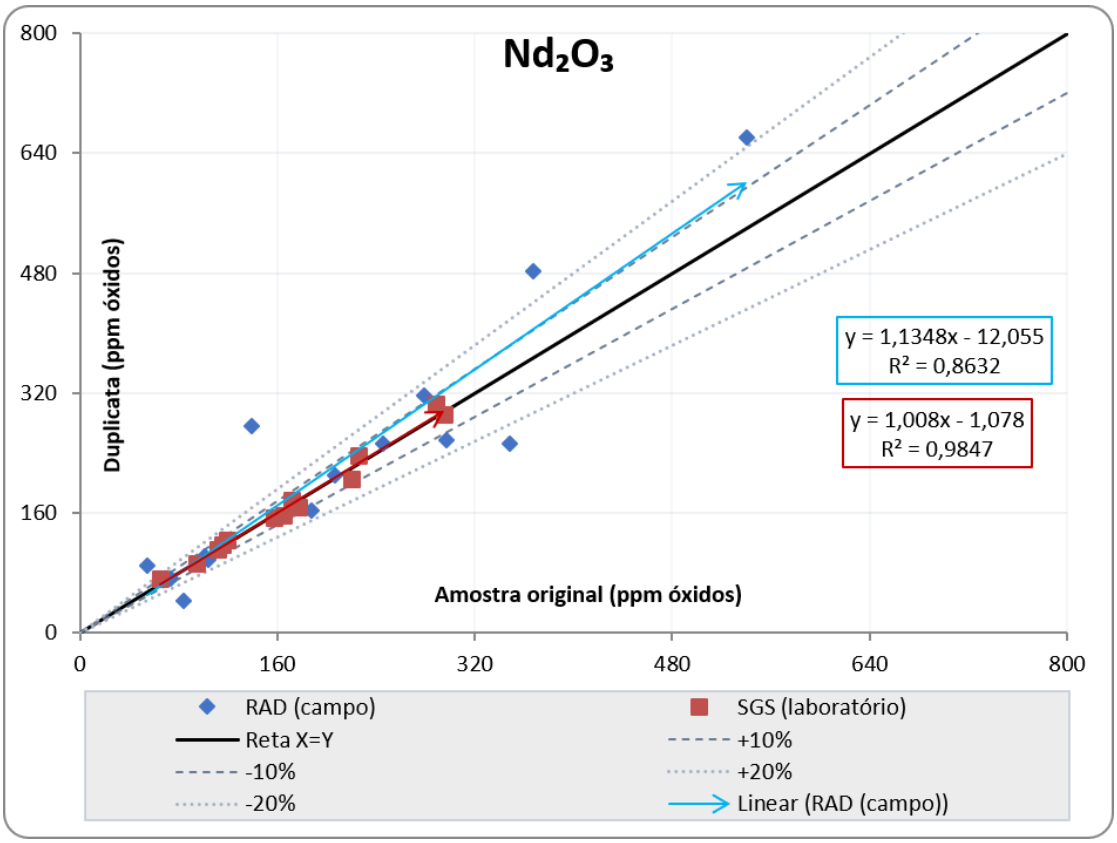
4.3.3 Diagramas de dispersão dos óxidos de terras raras magnéticas

Os óxidos Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7 foram avaliados individualmente para verificar se o comportamento observado nos somatórios TREO+Y e MREO também se repete nos analitos que compõem o MREO. Essa avaliação é importante porque os somatórios podem suavizar variações específicas de determinados óxidos, especialmente quando há diferença de magnitude entre os analitos avaliados.

A interpretação dos diagramas foi realizada considerando a posição dos pares em relação à reta X=Y, os valores de R^2, o RPD médio, a ocorrência de pares acima de 20% e a distribuição dos pares por faixas de RPD. Essa abordagem segue a recomendação de avaliação integrada de dados pareados em QA/QC, na qual gráficos de dispersão, medidas relativas de diferença e tipo de duplicata devem ser analisados de forma conjunta (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Stanley; Lawie, 2007; Smee *et al*., 2024).

O Nd_2O_3 apresentou elevada concordância nas duplicatas laboratoriais SGS, com R^2 = 0,9847, RPD médio de 4,19% e ausência de pares acima de 20%. A linha de tendência da SGS ficou próxima da reta X=Y, indicando que os valores duplicados acompanharam bem os valores originais. Nas duplicatas de campo RAD, o R^2 foi de 0,8632, com RPD médio de 21,15% e cinco pares acima de 20%. Esse comportamento mostra que o Nd_2O_3 segue o mesmo padrão observado nos somatórios: boa repetibilidade laboratorial e maior variabilidade nas duplicatas de campo.

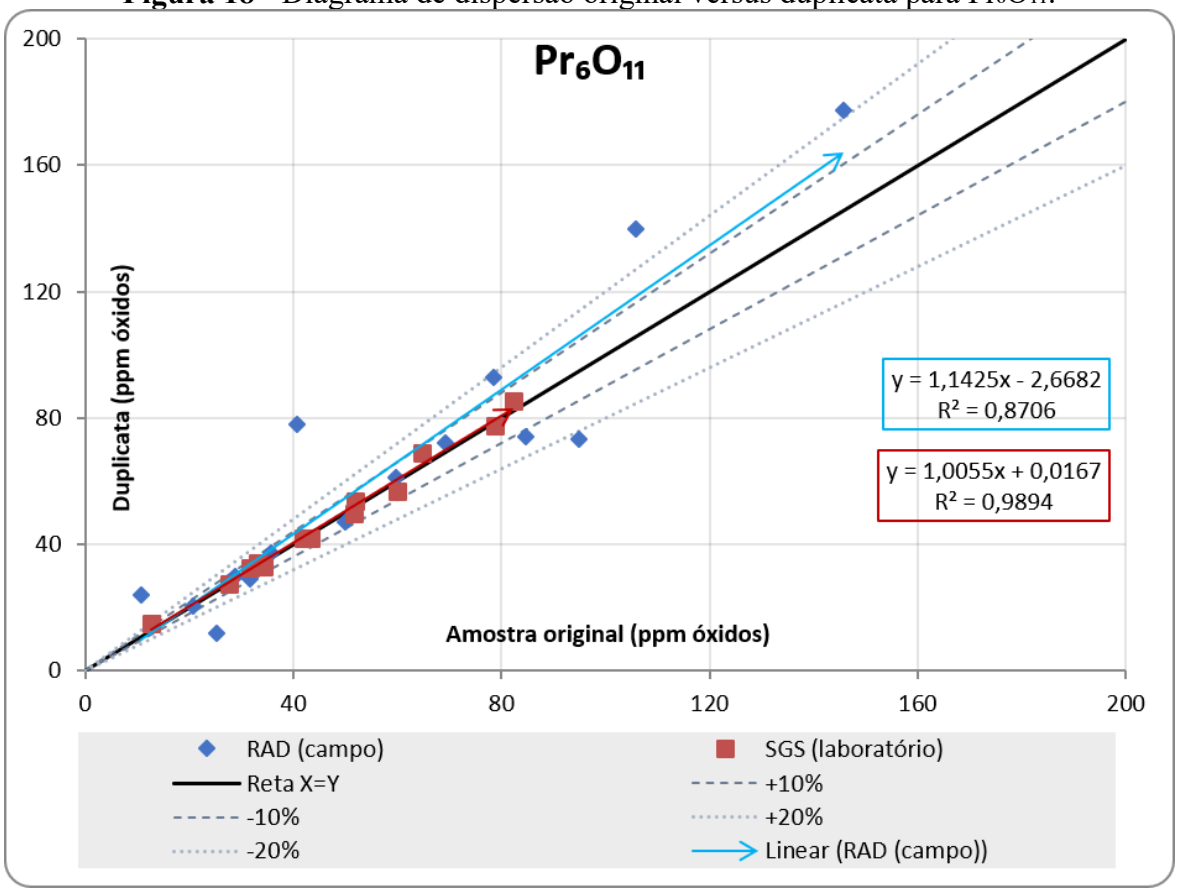
Figura 17 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Nd_2O_3.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

O Pr_6O_{11} apresentou comportamento semelhante mostrados na Figura 18. As duplicatas laboratoriais SGS registraram $R^2 = 0,9894$, RPD médio de 4,14% e nenhum par acima de 20%, embora um par tenha ficado na faixa intermediária entre 10% e 20%. Já as duplicatas de campo RAD apresentaram $R^2 = 0,8706$, RPD médio de 22,97% e cinco pares acima de 20%. O maior RPD foi registrado no furo AUGTR_0032, intervalo 6–7 m, com RPD de 75,36%. Esse resultado indica a presença de discrepâncias pontuais importantes nas duplicatas de campo para Pr_6O_{11}, as quais devem ser avaliadas individualmente na análise de pares discrepantes.

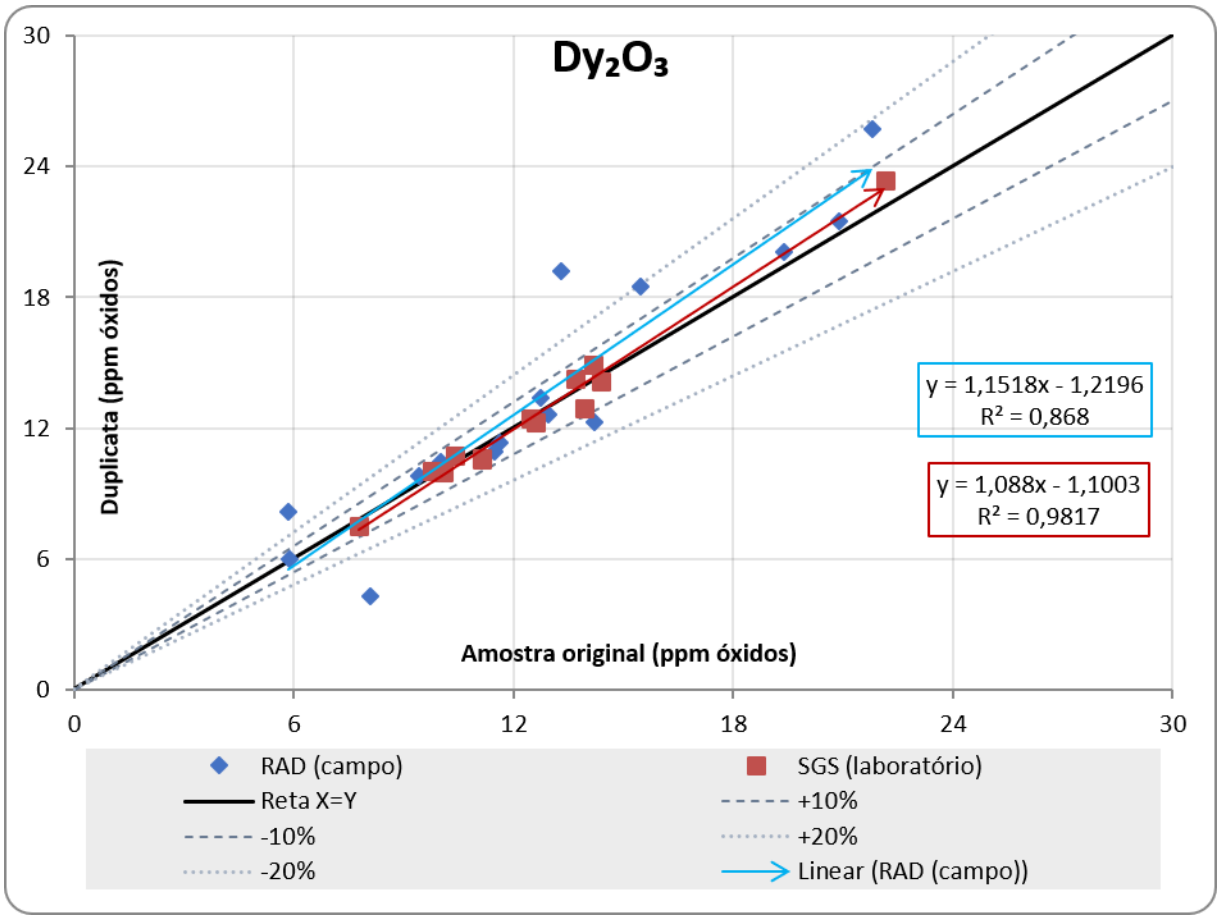
Figura 18 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Pr_6O_{11}.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

Para o Dy_2O_3, as duplicatas laboratoriais SGS apresentaram $R^2 = 0,9817$, RPD médio de 3,58% e nenhum par acima de 20% (Figura 19). Nas duplicatas de campo RAD, o R^2 foi de 0,8680, com RPD médio de 13,94%, mediana de 4,66% e três pares acima de 20%. O maior RPD ocorreu no furo AUGTR_0007, intervalo 4–5 m, com RPD de 61,11%. Apesar da ocorrência de pares discrepantes, a mediana baixa indica que a maior parte das duplicatas de campo para Dy_2O_3 apresentou concordância satisfatória, sendo a variabilidade elevada concentrada em poucos pares.

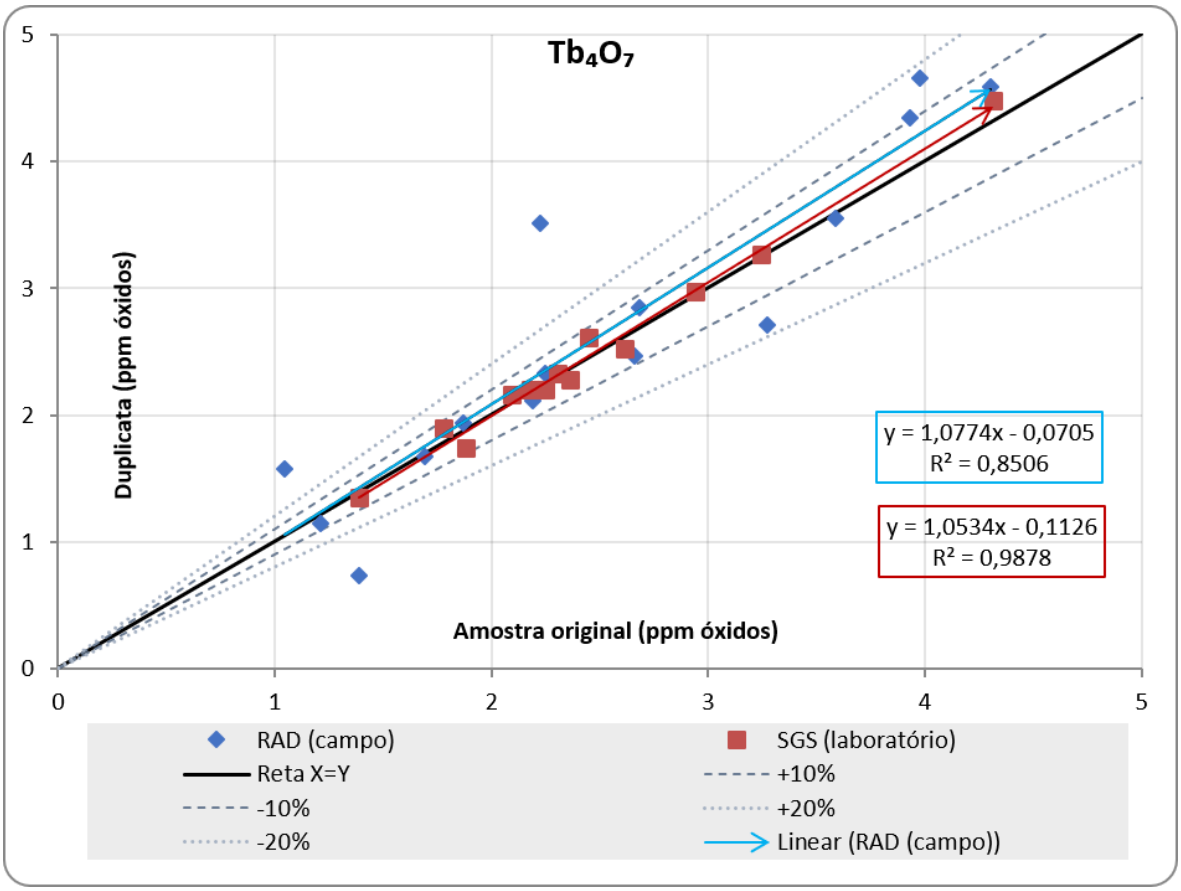
Figura 19 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Dy_2O_3.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

O Tb_4O_7 mostrado na Figura 20 também apresentou elevada concordância nas duplicatas laboratoriais SGS, com $R^2 = 0,9878$, RPD médio de 3,32% e nenhum par acima de 20%. Nas duplicatas de campo RAD, o R^2 foi de 0,8506, com RPD médio de 15,40%, mediana de 6,35% e três pares acima de 20%. O maior RPD ocorreu novamente no furo AUGTR_0007, intervalo 4–5 m, com RPD de 62,22%. Como o Tb_4O_7 ocorre em menores concentrações, pequenas diferenças absolutas entre original e duplicata podem resultar em diferenças percentuais elevadas. Por isso, sua interpretação deve considerar tanto o RPD quanto a magnitude absoluta dos teores, especialmente nos pares de campo.

Figura 20 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para Tb_4O_7.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

A Tabela 12 sintetiza a distribuição dos pares original–duplicata por faixas de RPD para os quatro óxidos de terras raras magnéticas. Essa classificação permite complementar a interpretação dos diagramas de dispersão, pois identifica a proporção de pares com boa concordância, diferença moderada ou discrepância elevada em cada tipo de duplicata.

Tabela 12 - Distribuição dos pares original–duplicata dos óxidos de terras raras magnéticas por faixas de RPD.

Analito	Tipo de duplicata	RPD ≤5%	RPD >5–10%	RPD >10–20%	RPD >20%	Total de pares
Pr_6O_{11}	RAD	5	2	3	5	15
Pr_6O_{11}	SGS	10	2	1	0	13
Nd_2O_3	RAD	5	1	4	5	15
Nd_2O_3	SGS	8	5	0	0	13
Dy_2O_3	RAD	9	0	3	3	15
Dy_2O_3	SGS	9	4	0	0	13
Tb_4O_7	RAD	5	5	2	3	15
Tb_4O_7	SGS	10	3	0	0	13

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A distribuição por faixas confirma a maior concordância das duplicatas laboratoriais SGS para os quatro óxidos de terras raras magnéticas. Para Pr_6O_{11}, dez dos treze pares SGS ficaram na faixa RPD ≤5%, dois pares entre >5–10% e apenas um entre >10–20%, sem ocorrência acima de 20%. Para Nd_2O_3, oito pares SGS ficaram em RPD ≤5% e cinco entre >5–10%, também sem ocorrência acima de 10%. No Dy_2O_3, nove pares SGS ficaram em RPD ≤5% e quatro entre >5–10%. Para Tb_4O_7, dez pares SGS ficaram em RPD ≤5% e três entre >5–10%. Assim, todos os pares SGS permaneceram abaixo de 20% nos quatro óxidos avaliados, reforçando a boa repetibilidade laboratorial.

Nas duplicatas RAD, a distribuição por faixas foi mais variável. Pr_6O_{11} e Nd_2O_3 apresentaram cinco pares acima de 20% em cada analito, acompanhando o comportamento observado no MREO. Esses dois óxidos também apresentaram os maiores RPDs médios entre os óxidos de terras raras magnéticas, com 22,97% para Pr_6O_{11} e 21,15% para Nd_2O_3. Esse padrão indica que os principais contribuintes do MREO em termos de magnitude analítica também concentram parte importante da variabilidade observada nas duplicatas de campo.

Para Dy_2O_3 e Tb_4O_7, a situação é distinta. O Dy_2O_3 apresentou nove pares RAD na faixa RPD ≤5%, indicando boa concordância para a maior parte dos pares, apesar da ocorrência de três pares acima de 20%. O Tb_4O_7 apresentou cinco pares RAD em RPD ≤5%, cinco pares entre

>5–10%, dois entre >10–20% e três acima de 20%. Portanto, embora também apresentem pares discrepantes, Dy_2O_3 e Tb_4O_7 mostram maior concentração de pares em faixas de baixa a moderada diferença relativa quando comparados a Pr_6O_{11} e Nd_2O_3.

Complementarmente à síntese quantitativa, foram organizadas tabelas 13,14 15 e 16 de identificação dos pares original–duplicata por faixas de RPD para cada óxido de terra rara magnética avaliado. Essa organização permite reconhecer quais intervalos amostrados concentram os pares de melhor concordância e quais pares apresentam maior discrepância relativa, distinguindo o comportamento das duplicatas de campo RAD e das duplicatas laboratoriais SGS.

Tabela 13 - Identificação dos pares original–duplicata de Pr_6O_{11} por faixas de RPD.

Faixa de RPD	**Duplicatas RAD**	**Duplicatas SGS**
≤5%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m	AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	AUGTR_0023, 2–3 m; AUGTR_0030, 1–2 m	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0025, 9–10 m
>10–20%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0041, 1–2 m	AUGTR_0032, 5–6 m
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m; AUGTR_0034, 8–9 m; AUGTR_0043, 5–6 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Tabela 14 - Identificação dos pares original–duplicata de Nd_2O_3 por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m	AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	AUGTR_0023, 2–3 m	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0032, 5–6 m
>10–20%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0041, 1–2 m	Não houve pares nesta faixa
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m; AUGTR_0034, 8–9 m; AUGTR_0043, 5–6 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Tabela 15 - Identificação dos pares original–duplicata de Dy_2O_3 por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0023, 2–3 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0043, 5–6 m	AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0032, 5–6 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	Não houve pares nesta faixa	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0027, 9–10 m
>10–20%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0034, 8–9 m; AUGTR_0041, 1–2 m	Não houve pares nesta faixa
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Tabela 16 - Identificação dos pares original–duplicata de Tb_4O_7 por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0023, 2–3 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m; AUGTR_0030, 1–2 m	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0032, 5–6 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0043, 5–6 m	AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m
>10–20%	AUGTR_0034, 8–9 m; AUGTR_0041, 1–2 m	Não houve pares nesta faixa
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A identificação dos pares por faixa de RPD confirma o contraste entre os dois tipos de controle QA/QC. Nas duplicatas laboratoriais SGS, os pares concentram-se principalmente nas faixas de menor diferença relativa, sem ocorrência de pares com RPD superior a 20% para Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7. Esse comportamento reforça a boa repetibilidade laboratorial observada nos diagramas de dispersão.

Nas duplicatas de campo RAD, por outro lado, observa-se maior dispersão entre as faixas de RPD, incluindo pares acima de 20% nos quatro óxidos avaliados. Os intervalos AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; e AUGTR_0032, 6–7 m aparecem de forma recorrente entre os pares mais discrepantes, especialmente nas faixas superiores de RPD. Esse padrão indica que a maior variabilidade está associada às duplicatas de campo, refletindo possíveis efeitos da heterogeneidade natural do material amostrado, da homogeneização e/ou do quarteamento, e não necessariamente instabilidade analítica do laboratório.

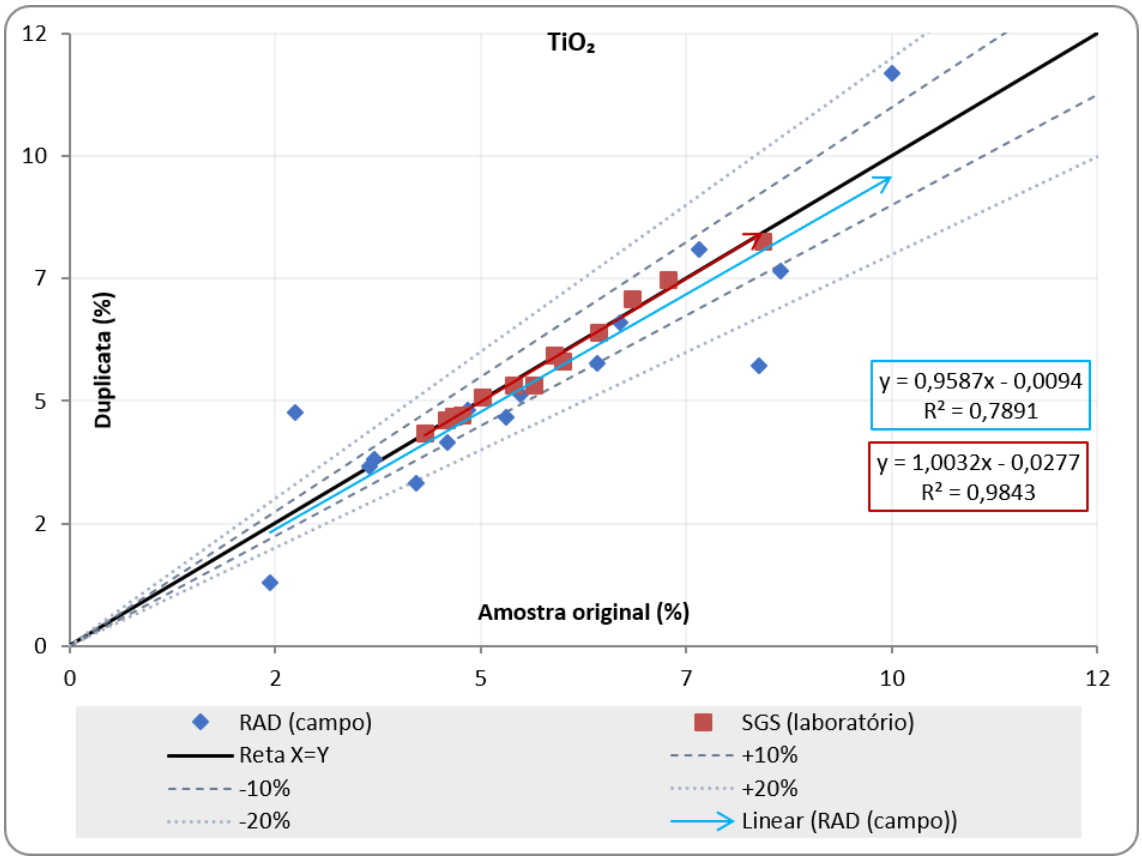
Dessa forma, os diagramas de dispersão, os valores médios de RPD e a identificação dos pares por faixas indicam comportamento consistente entre os quatro óxidos de terras raras magnéticas. As duplicatas laboratoriais SGS demonstram elevada repetibilidade e ausência de discrepâncias críticas, enquanto as duplicatas de campo RAD concentram as maiores diferenças relativas. Esse resultado é compatível com a natureza dos controles avaliados: as duplicatas laboratoriais refletem principalmente a repetibilidade da preparação e da análise em laboratório, enquanto as duplicatas de campo incorporam maior número de fontes de variação, incluindo coleta, homogeneização, quarteamento e heterogeneidade natural do material.

4.3.4 Diagramas de dispersão dos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5

Os óxidos TiO_2 e P_2O_5 foram avaliados separadamente por representarem variáveis litogeoquímicas associadas a fases titaníferas e fosfatadas. Embora não integrem os somatórios TREO+Y e MREO, esses óxidos auxiliam na leitura da consistência dos dados e da possível heterogeneidade mineralógica do material amostrado. O TiO_2 pode estar relacionado a minerais titaníferos, como titanita, ilmenita e rutilo, enquanto o P_2O_5 está associado principalmente a fases fosfatadas, como apatita e, em alguns contextos, monazita (Morales, 2017; Balaram, 2019; Gomes *et al*., 2020; Vieira *et al*., 2025).

No diagrama de dispersão do TiO_2 demonstrado na Figura 21, as duplicatas laboratoriais SGS apresentaram elevada concordância, com $R^2 = 0,9843$, RPD médio de 1,82% e ausência de pares acima de 20%. Nas duplicatas de campo RAD, o comportamento foi mais disperso, com $R^2 = 0,7891$, RPD médio de 17,09% e quatro pares acima de 20%. Esse contraste indica que a maior variabilidade do TiO_2 está associada às duplicatas de campo, e não ao controle laboratorial.

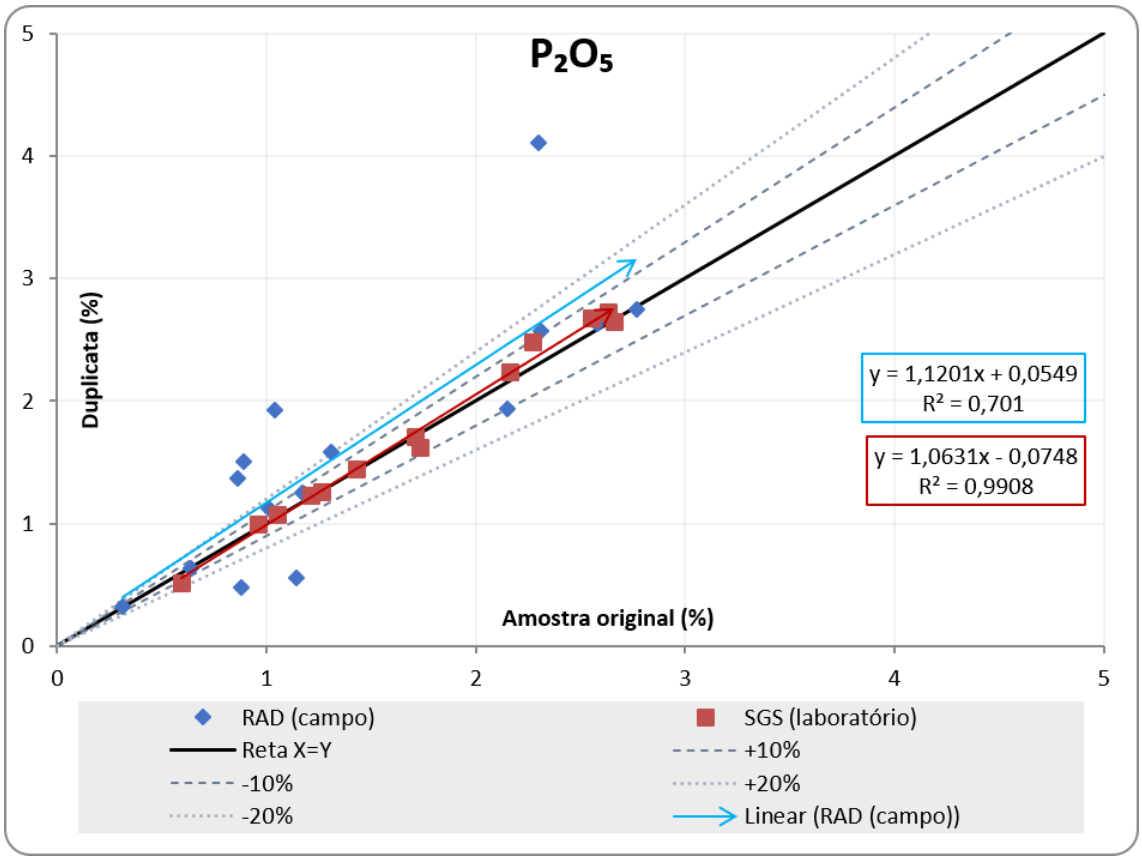
Figura 21 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para TiO_2.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

Para o P_2O_5 na Figura 22, as duplicatas SGS também apresentaram boa concordância, com $R^2 = 0,9908$, RPD médio de 3,83% e nenhum par acima de 20%. Nas duplicatas RAD, entretanto, o R^2 foi de 0,7010, o menor entre os analitos avaliados, com RPD médio de 26,99% e seis pares acima de 20%. Esse resultado mostra que o P_2O_5 foi o analito com maior discrepância relativa nas duplicatas de campo.

Figura 22 - Diagrama de dispersão original versus duplicata para P_2O_5.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados geoquímicos tratados do PTRP.

Para detalhar essa diferença entre os controles RAD e SGS, os pares foram classificados nas faixas RPD ≤5%, >5–10%, >10–20% e >20%. A faixa ≤5% foi utilizada como indicativa de alta concordância, enquanto a faixa >20% foi considerada discrepância relevante. Essa classificação foi utilizada como critério interpretativo, e não como limite absoluto de rejeição, pois a variabilidade esperada depende do tipo de duplicata, da matriz amostrada, da concentração do analito e da heterogeneidade do material (Stanley; Lawie, 2007; Abzalov, 2016; Smee *et al*., 2024).

Tabela 17 - Identificação dos pares original–duplicata de TiO_2 por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0027, 13–13,5 m,	AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0032, 5–6 m; AUGTR_0038, 1–2 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>5–10%	AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0023, 2–3 m	AUGTR_0003, 6–7 m
>10–20%	AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0041, 1–2 m; AUGTR_0043, 5–6 m,	Não houve pares nesta faixa
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0032, 6–7 m; AUGTR_0034, 8–9	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A distribuição dos pares de TiO_2 confirma a diferença entre os dois tipos de duplicata. Nas duplicatas SGS, 12 dos 13 pares ficaram na faixa RPD ≤5%, e apenas um par ficou entre >5–10%, sem ocorrência acima de 10%. Nas duplicatas RAD, apenas quatro pares ficaram em RPD ≤5%, enquanto cinco pares ficaram entre >10–20% e quatro pares ficaram acima de 20%. Os pares RAD acima de 20%, especialmente AUGTR_0007, AUGTR_0016, AUGTR_0032 e AUGTR_0034, indicam maior sensibilidade do TiO_2 à representatividade amostral e à possível distribuição heterogênea de fases titaníferas no material de campo.

Tabela 18 - Identificação dos pares original–duplicata de P_2O_5 por faixas de RPD.

Faixa de RPD	Duplicatas RAD	Duplicatas SGS
≤5%	AUGTR_0021, 1–2 m; AUGTR_0023, 2–3 m; AUGTR_0025, 12–12,7 m; AUGTR_0041, 1–2 m,	AUGTR_0003, 6–7 m; AUGTR_0007, 2–3 m; AUGTR_0012, 2–3 m; AUGTR_0014, 3–4 m; AUGTR_0017, 8–8,8 m; AUGTR_0020, 1–2 m; AUGTR_0022, 8–8,5 m; AUGTR_0025, 9–10 m; AUGTR_0027, 9–10 m; AUGTR_0032, 5–6 m
>5–10%	AUGTR_0027, 13–13,5 m	AUGTR_0030, 0–1 m; AUGTR_0042, 7–8 m
>10–20%	AUGTR_0004, 0–1 m; AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0043, 5–6 m,	AUGTR_0038, 1–2 m
>20%	AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0013, 11–12 m; AUGTR_0016, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0032, 6–7 m; AUGTR_0034, 8–9 m	Não houve pares nesta faixa

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

O P_2O_5 apresentou o comportamento mais crítico nas duplicatas de campo. Nas duplicatas SGS, 10 dos 13 pares ficaram na faixa RPD ≤5%, dois pares ficaram entre >5–10% e apenas um par ficou entre >10–20%, sem ocorrência acima de 20%. Nas duplicatas RAD, por outro lado, apenas quatro pares ficaram em RPD ≤5%, enquanto quatro pares ficaram entre >10–20% e seis pares ultrapassaram 20%. Os pares RAD críticos foram AUGTR_0007, AUGTR_0013, AUGTR_0016, AUGTR_0018, AUGTR_0032 e AUGTR_0034.

A concentração de discrepâncias de P_2O_5 nas duplicatas RAD sugere que esse óxido é especialmente sensível à heterogeneidade do material amostrado, possivelmente relacionada à distribuição irregular de fases fosfatadas, como apatita e outros minerais acessórios. Como as duplicatas SGS não apresentaram pares acima de 20%, a maior variabilidade observada no P_2O_5 não indica, isoladamente, problema de repetibilidade laboratorial, mas sim maior influência das etapas de campo, homogeneização, quarteamento e representatividade da amostra.

De forma geral, os resultados de TiO_2 e P_2O_5 mostram que os controles laboratoriais SGS apresentaram elevada concordância, enquanto as duplicatas de campo RAD concentraram as maiores discrepâncias. O P_2O_5 deve ser destacado como o principal analito de atenção entre os óxidos maiores associados, por apresentar o maior RPD médio RAD, o menor R^2 nas duplicatas de campo e o maior número de pares acima de 20%. Esses pares críticos serão retomados na discussão dos intervalos com RPD superior a 20%, pois representam os principais pontos de atenção para futuras etapas de controle de qualidade no PTRP

4.3.5 Síntese dos diagramas de dispersão

A síntese dos diagramas de dispersão original–duplicata indica comportamento distinto entre as duplicatas de campo RAD e as duplicatas laboratoriais SGS. Essa distinção é coerente com a literatura de QA/QC, pois cada tipo de duplicata avalia uma etapa diferente do processo de geração do dado geoquímico. As duplicatas de campo incorporam variações associadas à coleta, homogeneização, preparação inicial e heterogeneidade natural do material, enquanto as duplicatas laboratoriais avaliam mais diretamente a repetibilidade da preparação e da análise em laboratório (Abzalov, 2016; CIM, 2018).

Essa interpretação é reforçada por Abzalov (2016) ao afirmar que “deve-se dar atenção especial às duplicatas de campo, pois elas são as mais informativas para a estimativa da precisão global das amostras”. Dessa forma, a maior dispersão observada nas duplicatas RAD não deve ser interpretada automaticamente como erro analítico, mas como reflexo da variabilidade acumulada ao longo do processo amostral.

Nos pares SGS, todos os analitos avaliados apresentaram elevada aderência à reta X=Y, com R^2 superior a 0,98, RPD médio inferior a 5% e ausência de pares com RPD superior a 20%. Esse comportamento indica boa repetibilidade laboratorial para os somatórios TREO+Y e MREO, para os óxidos de terras raras magnéticas Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7, e para os óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5. Em avaliações de dados pareados, a análise gráfica é importante porque permite reconhecer dispersão, pares discrepantes e possíveis tendências sistemáticas entre duas séries de resultados analíticos (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016).

Nas duplicatas RAD, os diagramas também indicaram correlação positiva entre originais e duplicatas, porém com maior espalhamento em relação à reta X=Y. Os maiores

RPDs médios ocorreram em P_2O_5, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, MREO e TREO+Y, indicando que esses analitos concentraram maior variabilidade no controle de campo. Esse padrão é compatível com a função das duplicatas de campo, que avaliam a precisão global do processo amostral e a representatividade dos pares, e não apenas a repetibilidade analítica (Abzalov, 2016; CIM, 2018).

Tabela 19 - Síntese dos indicadores dos diagramas de dispersão por analito e tipo de duplicata.

Analito	Tipo de duplicata	n pares	R^2	RPD médio (%)	RPD máximo (%)	Pares >20%
TREO+Y	RAD	15	0,8875	20,62	70,89	5
TREO+Y	SGS	13	0,9885	3,30	7,22	0
MREO	RAD	15	0,8649	21,05	67,10	5
MREO	SGS	13	0,9860	3,96	9,37	0
Nd_2O_3	RAD	15	0,8632	21,15	66,42	5
Nd_2O_3	SGS	13	0,9847	4,19	9,95	0
Pr_6O_{11}	RAD	15	0,8706	22,97	75,36	5
Pr_6O_{11}	SGS	13	0,9894	4,14	14,70	0
Dy_2O_3	RAD	15	0,8680	13,94	61,11	3
Dy_2O_3	SGS	13	0,9817	3,58	7,70	0
Tb_4O_7	RAD	15	0,8506	15,40	62,23	3
Tb_4O_7	SGS	13	0,9878	3,32	7,79	0
TiO_2	RAD	15	0,7891	17,09	62,18	4
TiO_2	SGS	13	0,9843	1,82	5,89	0
P_2O_5	RAD	15	0,7010	26,99	68,24	6
P_2O_5	SGS	13	0,9908	3,83	12,61	0

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A Tabela 19 confirma que os melhores indicadores de concordância pertencem às duplicatas laboratoriais SGS. Para esse grupo, não houve pares acima de 20% em nenhum dos analitos avaliados, e os valores de RPD médio permaneceram baixos. Considerando que a comparação por pares é utilizada para avaliar a precisão e reconhecer erros aleatórios, dispersões ou tendências sistemáticas, os resultados SGS sustentam a boa consistência laboratorial do banco geoquímico tratado (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016).

Para as duplicatas RAD, a maior dispersão observada nos diagramas e os maiores valores de RPD indicam maior variabilidade associada ao controle de campo. Essa variabilidade não invalida o banco de dados, mas evidencia a necessidade de atenção aos pares mais discrepantes, especialmente em materiais de trado, nos quais pequenas diferenças de representatividade, homogeneização ou proporção de minerais acessórios podem produzir diferenças relativas expressivas. Nesse sentido, a representatividade das duplicatas deve abranger diferentes faixas de teor, unidades geológicas, estilos de mineralização e distribuição espacial do depósito, conforme recomendado por Abzalov (2016).

A análise integrada dos diagramas também mostra que parte da variabilidade RAD está concentrada em pares específicos. O intervalo AUGTR_0007, 4–5 m, aparece de forma recorrente entre os maiores desvios de TREO+Y, MREO, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7 e TiO_2. Para Pr_6O_{11}, o maior RPD ocorreu no intervalo AUGTR_0032, 6–7 m, enquanto para P_2O_5 a maior discrepância foi registrada no intervalo AUGTR_0013, 11–12 m. Essa recorrência indica que as maiores discrepâncias não estão distribuídas de forma homogênea em todo o conjunto de dados, mas concentradas em pares que devem ser avaliados individualmente.

Dessa forma, a síntese dos diagramas de dispersão indica que o banco geoquímico tratado apresenta boa consistência laboratorial, principalmente nas duplicatas SGS. As maiores discrepâncias estão associadas às duplicatas de campo RAD e refletem, provavelmente, a variabilidade do processo amostral, a heterogeneidade natural do material de trado e a representatividade dos pares. Por isso, os pares com RPD superior a 20% são avaliados individualmente na seção seguinte, conforme recomendado para a interpretação crítica de dados pareados em programas de QA/QC mineral (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Stanley; Lawie, 2007).

4.4 Avaliação do RPD por analito e tipo de duplicata

Após a avaliação gráfica dos pares original–duplicata, o RPD foi utilizado para quantificar a diferença relativa entre as amostras originais e suas respectivas duplicatas. Enquanto os diagramas de dispersão permitem avaliar visualmente a proximidade dos pares em relação à reta X=Y, o RPD permite comparar numericamente a magnitude da diferença entre os pares, por analito e por tipo de duplicata. A utilização de medidas relativas de erro em dados geoquímicos pareados deve ser interpretada com cautela, pois diferentes métricas podem expressar aspectos distintos da variabilidade analítica e amostral (Stanley; Lawie, 2007).

Neste trabalho, conforme os critérios definidos na seção 4.2, os valores de RPD foram organizados nas faixas ≤5%, >5–10%, >10–20% e >20%. A faixa ≤5% foi utilizada como referência de excelente concordância; a faixa >5–10% como boa concordância; a faixa >10–20% como intervalo de atenção; e os valores superiores a 20% como casos prioritários para avaliação individual. Nos gráficos de RPD por par, as linhas horizontais de 5%, 10% e 20% foram inseridas como referências visuais para diferenciar a distribuição dos pares nessas faixas.

A interpretação do RPD considerou a distinção entre duplicatas de campo RAD e duplicatas laboratoriais SGS. Essa diferenciação é necessária porque cada tipo de duplicata representa uma etapa distinta do processo de geração do dado geoquímico. Abzalov (2016, p. 157, tradução nossa) ressalta que "deve-se dar atenção especial às duplicatas de campo", pois elas são mais informativas para estimar a precisão global das amostras. Portanto, os valores de RPD das duplicatas RAD foram interpretados como indicadores da variabilidade acumulada desde a coleta até a preparação inicial, enquanto os valores das duplicatas SGS foram interpretados como indicadores mais diretamente relacionados à repetibilidade laboratorial. A Tabela 20 apresenta a síntese dos valores médios de RPD e da quantidade de pares com RPD superior a 20% para cada analito e tipo de duplicata.

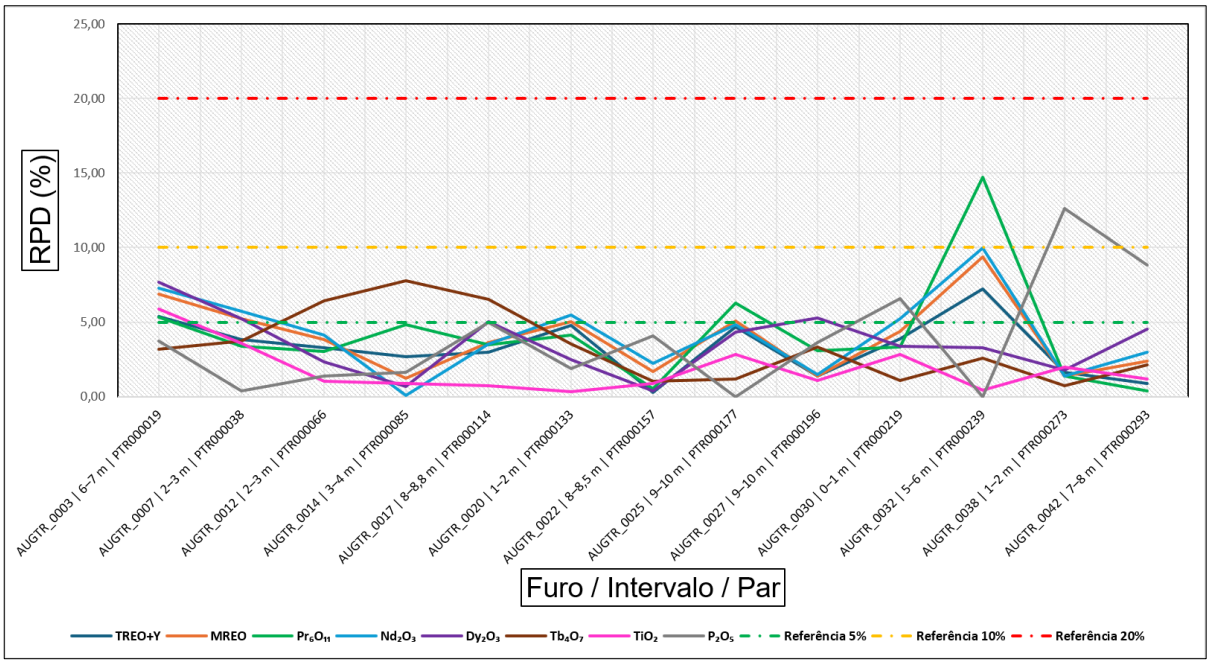
Tabela 20 - Síntese dos valores de RPD por analito e tipo de duplicata.

Analito	RPD médio RAD (%)	Pares RAD >20%	RPD médio SGS (%)	Pares SGS >20%
TREO+Y	20,62	5	3,30	0
MREO	21,05	5	3,96	0
Pr_6O_{11}	22,97	5	4,14	0
Nd_2O_3	21,15	5	4,19	0
Dy_2O_3	13,94	3	3,58	0
Tb_4O_7	15,40	3	3,32	0
TiO_2	17,09	4	1,82	0
P_2O_5	26,99	6	3,83	0

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Os resultados sintetizados na Tabela 20 mostram que as duplicatas SGS apresentaram RPD médio inferior a 5% para todos os analitos avaliados, variando de 1,82% para TiO_2 a 4,19% para Nd_2O_3. Além disso, nenhum par SGS apresentou RPD superior a 20%. Esse comportamento indica que as diferenças relativas associadas às duplicatas laboratoriais permaneceram baixas tanto para os somatórios TREO+Y e MREO quanto para os óxidos individuais Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5.

Figura 23 - Distribuição dos valores de RPD por par original–duplicata para as duplicatas laboratoriais SGS.

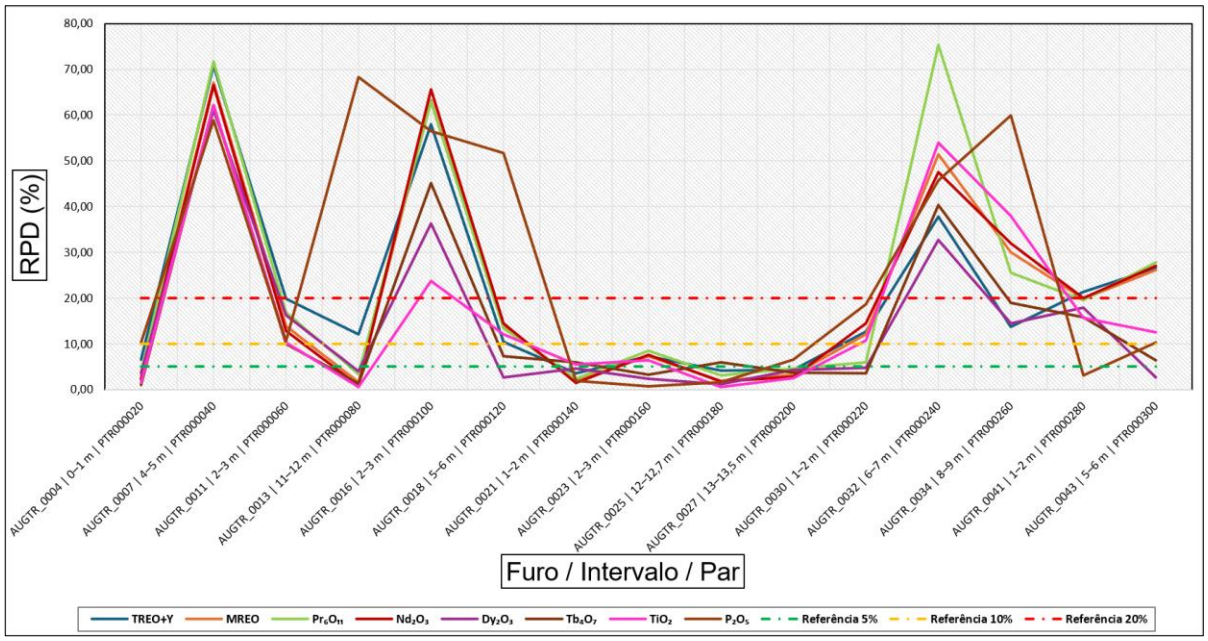


Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

A Figura 23 confirma a concentração dos pares SGS nas faixas de menor diferença relativa. A maior parte dos valores permanece abaixo das linhas de 5% e 10%, e os poucos valores que ultrapassam 10% permanecem abaixo de 20%. Esse padrão reforça a boa repetibilidade laboratorial do conjunto SGS e não indica ocorrência de discrepâncias críticas nesse grupo.

Nas duplicatas RAD, os valores médios de RPD foram mais elevados. Os maiores RPDs médios ocorreram em P_2O_5, com 26,99%; Pr_6O_{11}, com 22,97%; Nd_2O_3, com 21,15%; MREO, com 21,05%; e TREO+Y, com 20,62%. Esses mesmos analitos também concentraram o maior número de pares acima de 20%, com seis ocorrências para P_2O_5 e cinco ocorrências para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11} e Nd_2O_3. Dy_2O_3, Tb_4O_7 e TiO_2 apresentaram RPD médio inferior a 20%, mas ainda registraram pares pontuais acima desse limite.

Figura 24 - Distribuição dos valores de RPD por par original–duplicata para as duplicatas de campo RAD.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Na Figura 24, observa-se que os maiores valores de RPD das duplicatas RAD não ocorrem de forma contínua ao longo de todos os pares, mas aparecem como picos concentrados em intervalos específicos. Esse comportamento é relevante porque indica que a variabilidade não afeta homogeneamente toda a base de dados, mas se concentra em determinados pares original–duplicata. Em programas de QA/QC, esse tipo de leitura é importante, pois pares duplicados devem ser interpretados considerando a etapa do processo que representam, a representatividade da amostra e a possibilidade de heterogeneidade do material (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Smee *et al*., 2024).

A maior variabilidade das duplicatas RAD é compatível com a natureza das duplicatas de campo. Diferentemente das duplicatas laboratoriais, esse tipo de controle incorpora variações associadas à coleta, homogeneização, quarteamento, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado. Além disso, em materiais de trado, pequenas diferenças na proporção de minerais acessórios, fases fosfatadas, minerais titaníferos ou minerais portadores de terras raras podem gerar diferenças relativas expressivas entre original e duplicata. Assim, os valores elevados de RPD em pares RAD não foram interpretados automaticamente como erro analítico, mas como indicativos de pares que exigem avaliação individual.

Entre os analitos avaliados, o P_2O_5 apresentou o comportamento mais discrepante nas duplicatas RAD, com o maior RPD médio e o maior número de pares acima de 20%. Como esse óxido está relacionado principalmente a fases fosfatadas, como apatita e minerais acessórios, sua variabilidade pode refletir distribuição mineralógica heterogênea no material amostrado, especialmente em amostras de trado. Essa interpretação é coerente com a utilização do P_2O_5 como variável associada a fases fosfatadas em contextos carbonatíticos, metacarbonatíticos e alcalinos (Morales, 2017; Garcia, 2023; Vieira *et al*., 2025).

De forma geral, a avaliação do RPD por analito e tipo de duplicata confirma que as diferenças relativas mais expressivas estão concentradas nas duplicatas de campo RAD, enquanto as duplicatas laboratoriais SGS permaneceram dentro das faixas de melhor concordância. Por esse motivo, os pares com RPD superior a 20% foram separados para análise individual, considerando furo, intervalo, amostra original, duplicata, número de analitos afetados e RPD máximo. Essa análise é apresentada na seção seguinte.

4.4.1 Pares com RPD superior a 20%

A partir da avaliação do RPD por analito e tipo de duplicata, foram selecionados os pares que apresentaram pelo menos um analito com RPD superior a 20%. Essa etapa teve como objetivo identificar quais furos e intervalos concentraram as maiores discrepâncias relativas, bem como verificar se os desvios ocorreram de forma pontual ou se afetaram vários analitos de um mesmo par.

No conjunto avaliado, não foram observados pares SGS com RPD superior a 20%. Todas as ocorrências acima desse critério foram registradas nas duplicatas de campo RAD. Ao todo, foram identificadas 36 ocorrências analito-par com RPD superior a 20%, concentradas em 8 pares original–duplicata. Esse resultado indica que as maiores discrepâncias não estão distribuídas de forma homogênea em toda a base, mas concentradas em intervalos específicos. A Tabela 21 apresenta a síntese dos pares original–duplicata que apresentaram pelo menos um analito com RPD superior a 20%.

Tabela 21 - Síntese dos pares original–duplicata com RPD superior a 20%.

Furo	Intervalo	Amostra original	Duplicata	Nº de analitos RPD >20%	Analitos afetados	RPD máx. (%)
AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	8	TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2, P_2O_5	71,71
AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	1	P_2O_5	68,24
AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	8	TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2, P_2O_5	65,62
AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	1	P_2O_5	51,67
AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	8	TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2, P_2O_5	75,36
AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	5	MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, TiO_2, P_2O_5	59,93
AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	1	TREO+Y	21,41
AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	4	TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3	27,82

Fonte: Elaborado pela autora com base nos pares original–duplicata do banco geoquímico tratado do PTRP.

Os pares dos furos AUGTR_0007, AUGTR_0016 e AUGTR_0032 constituem os casos mais críticos da base de duplicatas RAD, pois apresentaram RPD superior a 20% nos oito analitos avaliados. Nesses três pares, a discrepância ocorreu simultaneamente nos somatórios TREO+Y e MREO, nos óxidos individuais de terras raras magnéticas e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5. Esse comportamento indica que a diferença entre original e duplicata não está restrita a um único componente geoquímico, mas afeta de forma ampla o conjunto analisado.

O par AUGTR_0032, intervalo 6–7 m, apresentou o maior RPD máximo do conjunto, com 75,36%. Como esse par também apresentou RPD superior a 20% em todos os analitos, ele deve ser considerado um dos principais pontos de atenção da base. De forma semelhante, os pares AUGTR_0007, 4–5 m, e AUGTR_0016, 2–3 m, também apresentaram discrepância ampla, com oito analitos afetados cada. Nesses casos, a recorrência do desvio em diferentes grupos geoquímicos sugere que a variabilidade pode estar relacionada à representatividade do material duplicado, à homogeneização ou à distribuição heterogênea de minerais no intervalo amostrado.

Os pares AUGTR_0013, 11–12 m, e AUGTR_0018, 5–6 m, apresentaram comportamento diferente, pois a discrepância acima de 20% ocorreu apenas em P_2O_5. Esse padrão sugere uma variação mais específica associada ao componente fosfatado, e não uma discrepância generalizada entre original e duplicata. Considerando a relação do P_2O_5 com apatita e outros minerais acessórios, esses pares podem refletir heterogeneidade pontual de fases fosfatadas no material de trado.

O par AUGTR_0034, intervalo 8–9 m, apresentou cinco analitos acima de 20%, incluindo MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, TiO_2 e P_2O_5. Esse comportamento indica discrepância intermediária, afetando tanto óxidos de terras raras magnéticas quanto óxidos maiores associados. Já o par AUGTR_0043, intervalo 5–6 m, apresentou quatro analitos acima de 20%, restritos a TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11} e Nd_2O_3. Por fim, o par AUGTR_0041, intervalo 1–2 m, apresentou apenas TREO+Y acima de 20%, com RPD máximo de 21,41%, valor próximo ao limite adotado para revisão individual.

A concentração das discrepâncias em poucos pares reforça que a variabilidade observada nas duplicatas RAD não compromete de forma uniforme todo o banco geoquímico. Em vez disso, indica a existência de intervalos específicos que exigem cautela interpretativa. Conforme discutido por Abzalov (2016), duplicatas devem ser representativas das diferentes faixas de teor, tipos de mineralização, unidades geológicas e distribuição espacial do depósito. Da mesma forma, Smee *et al*. (2024) destacam que pares duplicados devem ser corretamente vinculados às amostras primárias para permitir sua interpretação, e que gráficos de diferença relativa, dispersão e comportamento por teor são ferramentas úteis para reconhecer pares discrepantes.

Assim, os pares listados na Tabela 21 devem ser mantidos no banco de dados, mas sinalizados como intervalos de atenção para interpretações futuras. A ausência de pares SGS

acima de 20% indica que as discrepâncias mais expressivas não estão associadas à etapa laboratorial avaliada, mas principalmente às duplicatas de campo. Dessa forma, a avaliação individual dos pares acima de 20% reforça a necessidade de considerar a representatividade amostral e a heterogeneidade do material de trado na interpretação dos dados geoquímicos do PTRP.

4.5 Avaliação de bias por diferença versus média

A análise de *bias* foi utilizada como complemento aos diagramas de dispersão e ao RPD, permitindo avaliar não apenas a magnitude das diferenças entre original e duplicata, mas também o sentido dessas diferenças ao longo da faixa de teores analisada. Conforme discutido por Sinclair e Blackwell (2002), a avaliação de dados pareados de controle de qualidade deve considerar a dispersão dos pares, possíveis tendências sistemáticas e o comportamento das diferenças em função da concentração. Abzalov (2016) também destaca que duplicatas devem ser interpretadas conforme o tipo de controle e a etapa do processo em que foram geradas, distinguindo variações associadas à amostragem daquelas relacionadas à preparação e à análise laboratorial.

A Tabela 22 sintetiza os principais parâmetros obtidos para os pares RAD e SGS, incluindo o *bias* médio, o desvio padrão das diferenças e a inclinação da linha de tendência. Considerando o número limitado de pares avaliados, os resultados foram interpretados como diagnóstico exploratório, e não como teste estatístico definitivo. Esse cuidado é necessário porque estimativas baseadas em poucos pares podem ser influenciadas por valores individuais mais discrepantes, especialmente em materiais geologicamente heterogêneos (Stanley; Lawie, 2007; Smee *et al*., 2024).

Tabela 22 - Síntese da avaliação de bias por diferença entre duplicata e original para os pares RAD e SGS.

Analito	RAD: *bias* médio	RAD: DP	RAD: inclinação	SGS: *bias* médio	SGS: DP	SGS: inclinação
TREO+Y	+131,48 ppm	328,45	0,259	+2,22 ppm	41,19	0,022
MREO	+22,82 ppm	83,99	0,208	+0,58 ppm	11,49	0,018
Pr_6O_{11}	+5,71 ppm	17,36	0,209	+0,28 ppm	2,12	0,011
Nd_2O_3	+16,24 ppm	64,42	0,207	+0,28 ppm	8,99	0,016
Dy_2O_3	+0,73 ppm	2,34	0,219	+0,01 ppm	0,60	0,094
Tb_4O_7	+0,13 ppm	0,48	0,161	+0,02 ppm	0,10	0,058
TiO_2	-0,23 %	1,08	0,081	-0,01 %	0,15	0,011
P_2O_5	+0,23 %	0,58	0,314	+0,03 %	0,08	0,066

Fonte: Elaborado pela autora.

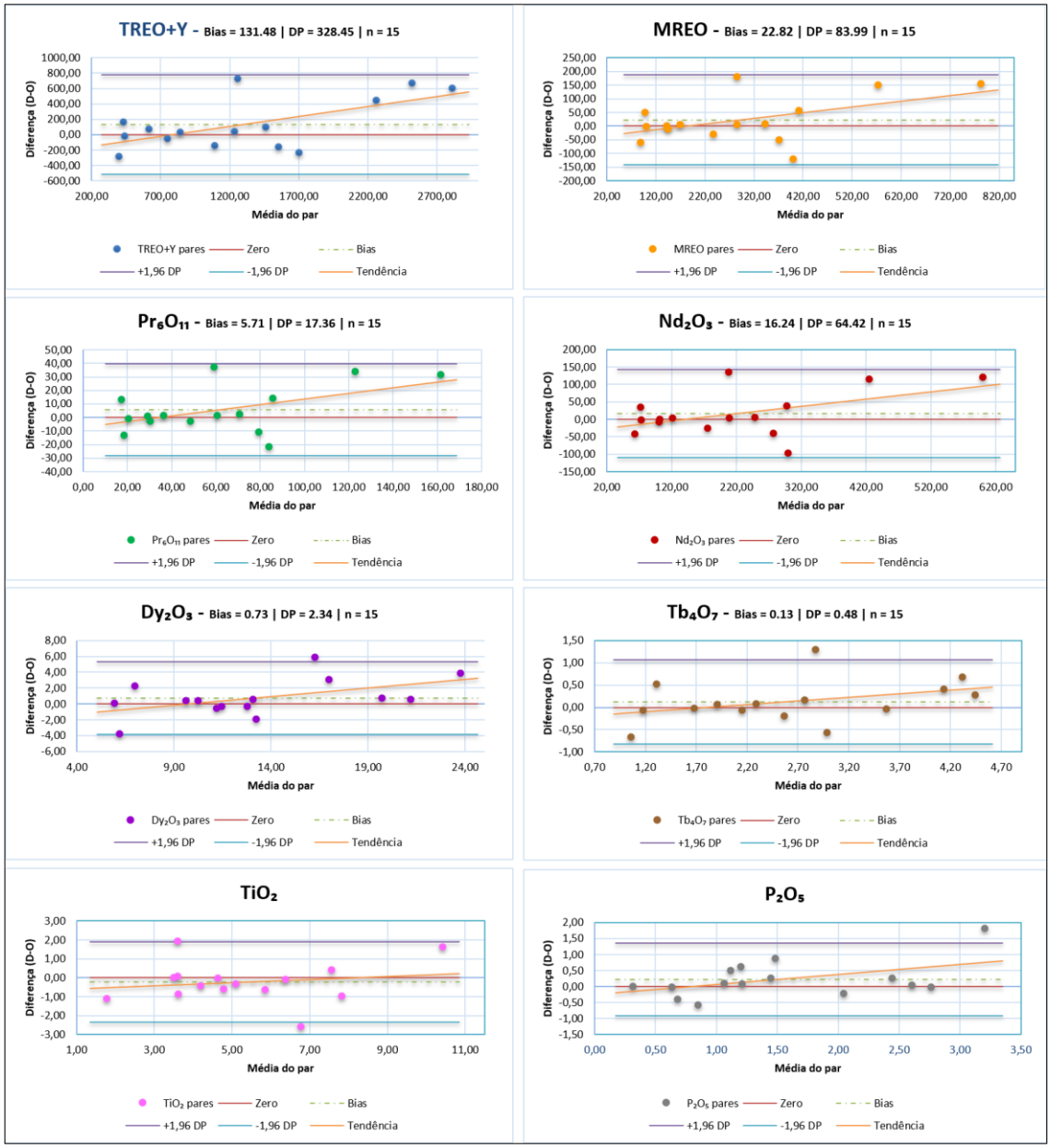
Nas duplicatas de campo RAD, observa-se maior amplitude das diferenças e maiores desvios padrão em comparação às duplicatas SGS. Para os somatórios de terras raras, o TREO+Y apresentou *bias* médio de +131,48 ppm e desvio padrão de 328,45 ppm, enquanto o MREO apresentou *bias* médio de +22,82 ppm e desvio padrão de 83,99 ppm. Esses valores indicam que, em média, as duplicatas RAD apresentaram teores superiores aos das amostras originais para os somatórios avaliados, embora com dispersão elevada entre os pares. Portanto, o deslocamento médio positivo deve ser interpretado em conjunto com a variabilidade dos dados, e não como evidência isolada de erro sistemático.

Entre os óxidos de terras raras magnéticas avaliados individualmente, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7 também apresentaram *bias* médio positivo nas duplicatas RAD. O Nd_2O_3 foi o óxido individual com maior diferença média absoluta entre os ETR magnéticos, com *bias* de +16,24 ppm e desvio padrão de 64,42 ppm. Esse comportamento é coerente com sua maior

contribuição relativa para o MREO e indica que a variação observada no somatório é influenciada principalmente pelos óxidos de maior magnitude analítica.

O TiO_2 apresentou comportamento distinto dos demais analitos nas duplicatas RAD, com *bias* médio negativo de -0,23%, indicando que, em média, as duplicatas de campo apresentaram valores ligeiramente inferiores aos das amostras originais para esse óxido. Já o P_2O_5 apresentou *bias* médio positivo de +0,23% e a maior inclinação da linha de tendência entre os analitos RAD, com valor de 0,314. Essa inclinação sugere possível componente proporcional, ou seja, aumento da diferença entre original e duplicata conforme aumenta a média do par. Essa interpretação deve ser tratada com cautela, pois pode ser influenciada por poucos pares com maior discrepância, mas reforça a necessidade de atenção ao P_2O_5 nas duplicatas de campo.

Figura 25- Diagramas de diferença versus média para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5 nos pares originais–duplicata RAD. Cada ponto representa um par original–duplicata. O eixo X corresponde à média do par e o eixo Y à diferença entre duplicata e original. As linhas indicam a diferença zero, o *bias* médio, os limites de ±1,96 desvio padrão e a tendência linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

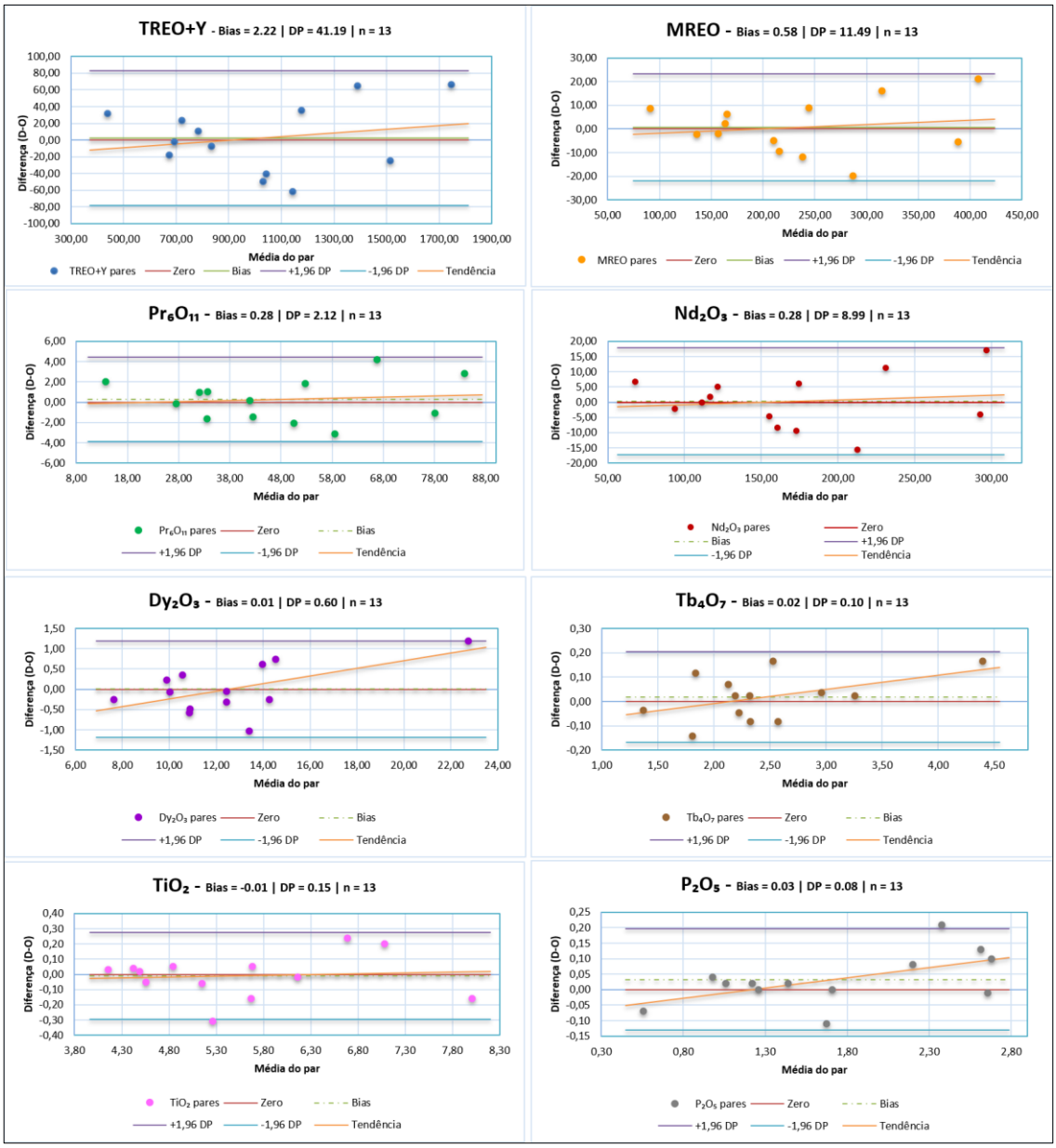
Os diagramas RAD evidenciam maior dispersão das diferenças em torno da linha zero, especialmente para TREO+Y, MREO, Nd_2O_3 e P_2O_5. Em parte dos analitos, a inclinação positiva da tendência sugere que as diferenças tendem a aumentar nos pares de maior média, caracterizando possível componente proporcional. Entretanto, em duplicatas de campo, esse

padrão não deve ser atribuído diretamente ao laboratório, pois esse tipo de controle incorpora variações relacionadas à coleta, homogeneização, quarteamento, preparação inicial e heterogeneidade natural do material amostrado. Essa interpretação é consistente com Abzalov (2016), Geboy e Engle (2011) e Smee *et al*. (2024), que destacam que duplicatas de campo avaliam a precisão global do processo de geração da amostra, e não apenas a repetição analítica.

Nas duplicatas laboratoriais SGS, os valores de *bias* médio foram próximos de zero para todos os analitos avaliados, acompanhados por menores desvios padrão e menores inclinações das linhas de tendência. Para TREO+Y, o *bias* médio foi de +2,22 ppm, com desvio padrão de 41,19 ppm, enquanto para MREO o *bias* médio foi de +0,58 ppm, com desvio padrão de 11,49 ppm. Esses valores são substancialmente inferiores aos observados nas duplicatas RAD, indicando maior estabilidade entre original e duplicata no controle laboratorial.

Nos óxidos individuais Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7, os *bias* médios nas duplicatas SGS também permaneceram próximos de zero. O Pr_6O_{11} apresentou *bias* médio de +0,28 ppm, o Nd_2O_3 de +0,28 ppm, o Dy_2O_3 de +0,01 ppm e o Tb_4O_7 de +0,02 ppm. Para os óxidos maiores associados, o TiO_2 apresentou *bias* médio de -0,01%, enquanto o P_2O_5 apresentou *bias* médio de +0,03%. Esses resultados indicam ausência de deslocamento médio relevante no controle laboratorial para os analitos avaliados.

Figura 26 - Diagramas de diferença versus média para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5 nos pares originais–duplicata SGS. Cada ponto representa um par original–duplicata. O eixo X corresponde à média do par e o eixo Y à diferença entre duplicata e original. As linhas indicam a diferença zero, o *bias* médio, os limites de ±1,96 desvio padrão e a tendência linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

A comparação entre as duplicatas RAD e SGS evidencia comportamentos distintos. Enquanto os pares SGS apresentam diferenças mais concentradas próximas da linha zero, os pares RAD exibem maior dispersão e maior amplitude das diferenças. Esse contraste é coerente

com a natureza dos dois controles: as duplicatas laboratoriais avaliam principalmente a repetição analítica e/ou de preparação em ambiente controlado, enquanto as duplicatas de campo incorporam maior número de fontes de variação, incluindo coleta, homogeneização, quarteamento e representatividade do material.

Dessa forma, a análise de *bias* confirma e complementa os resultados obtidos nos diagramas de dispersão e na avaliação do RPD. Os dados SGS não indicam *bias* laboratorial relevante para os analitos avaliados, enquanto os dados RAD evidenciam maior variabilidade associada à etapa de campo e preparação inicial. Assim, os resultados não invalidam o banco geoquímico tratado, mas indicam que as duplicatas de campo devem ser interpretadas com maior cautela, especialmente para TREO+Y, MREO, Nd_2O_3 e P_2O_5. Recomenda-se, em etapas futuras, ampliar o número de duplicatas de campo, reforçar os procedimentos de homogeneização e quarteamento e manter a avaliação separada entre controles de campo e controles laboratoriais.

4.6 Discussão integrada da qualidade dos dados

A discussão integrada da qualidade dos dados geoquímicos do PTRP foi realizada a partir da combinação entre diagramas de dispersão original–duplicata, faixas de RPD, avaliação numérica do RPD, identificação dos pares com RPD superior a 20%, análise de bias e localização espacial dos pares QA/QC. Essa integração é necessária porque cada ferramenta avalia um aspecto distinto da qualidade dos dados: os diagramas indicam a concordância geral entre original e duplicata; o RPD quantifica a diferença relativa; o bias avalia o sentido das diferenças; e a espacialização permite verificar se parte da variabilidade está relacionada a zonas de transição geológica ou geofísica.

Essa abordagem está de acordo com a literatura de QA/QC em exploração mineral. Sinclair e Blackwell (2002) destacam que dados pareados devem ser avaliados por métodos gráficos e estatísticos, considerando dispersão, correlação, valores discrepantes e possíveis tendências sistemáticas. Abzalov (2016) ressalta que as duplicatas devem ser interpretadas conforme o tipo de controle e a etapa do processo em que foram geradas, pois duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais não avaliam as mesmas fontes de variação. As diretrizes do CIM (2018) também reforçam que programas de exploração devem integrar amostragem, preparação, análise química, QA/QC, rastreabilidade e verificação dos dados.

A estatística descritiva inicial apresentada no item 3.11 fornece um primeiro contexto para essa discussão. Antes mesmo da comparação entre original e duplicata, o conjunto QA/QC já apresentava elevada dispersão geoquímica em parte dos analitos. Os maiores coeficientes de variação foram observados em Nd_2O_3, com 62,02%; Pr_6O_{11}, com 61,20%; MREO, com 59,84%; TREO+Y, com 54,32%; e P_2O_5, com 50,36%. Esses mesmos analitos também estão entre os que apresentaram maiores RPDs médios nas duplicatas de campo RAD. Portanto, a variabilidade observada nos pares de campo deve ser interpretada considerando que o conjunto analisado já apresenta ampla dispersão natural, especialmente para os óxidos de terras raras magnéticas, os somatórios MREO e TREO+Y e o P_2O_5.

No conjunto avaliado, as duplicatas laboratoriais SGS apresentaram o comportamento mais consistente. Nos diagramas de dispersão, os pares SGS mostraram elevada aderência à reta X=Y, com R^2 superior a 0,98 para todos os analitos. Na avaliação por RPD, os valores médios permaneceram abaixo de 5% e não houve pares com RPD superior a 20%. Na análise de bias, os valores médios ficaram próximos de zero, sem indicação de deslocamento sistemático relevante. Em conjunto, esses resultados indicam boa repetibilidade laboratorial para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5.

As duplicatas de campo RAD apresentaram maior variabilidade. Embora os diagramas indiquem correlação positiva entre originais e duplicatas, os pares RAD mostraram maior afastamento em relação à reta X=Y e maior dispersão nas faixas de RPD. Os maiores RPDs médios ocorreram em P_2O_5, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, MREO e TREO+Y, e todos os pares com RPD superior a 20% pertencem ao grupo RAD, totalizando 36 ocorrências analito-par concentradas em 8 pares original–duplicata. Esse padrão indica que a maior variabilidade não está distribuída de forma homogênea em todo o banco, mas concentrada em intervalos específicos.

Essa diferença entre RAD e SGS é coerente com a natureza dos controles avaliados. As duplicatas laboratoriais estão mais relacionadas à repetibilidade da preparação e da análise em laboratório, enquanto as duplicatas de campo incorporam variações de coleta, divisão do material, homogeneização, quarteamento, granulometria, preparação inicial e heterogeneidade natural da amostra. Abzalov (2016) destaca que “atenção especial deve ser dada às duplicatas de campo”, pois elas são mais informativas para estimar a precisão global das amostras. Dessa forma, os maiores desvios observados nas duplicatas RAD não devem ser interpretados automaticamente como erro analítico, mas como expressão da variabilidade acumulada ao longo da cadeia amostral.

A localização espacial dos pares QA/QC acrescenta uma dimensão importante à interpretação. Conforme discutido na seção 4.1.1, os furos com duplicatas estão associados à unidade titanita-hornblendito, o que concentra a avaliação em uma mesma unidade litológica principal. Essa condição reduz a interferência de comparações entre litologias muito distintas, mas não elimina a possibilidade de heterogeneidade interna. A própria unidade pode apresentar variações locais na proporção de minerais acessórios, fases titaníferas, fases fosfatadas e minerais portadores de ETR, especialmente em materiais de trado, nos quais a amostra pode incorporar solo, regolito e fragmentos de rocha em proporções variáveis.

Parte dos furos com duplicatas também ocorre em bordas de anomalias geofísicas terrestres, incluindo AUGTR_0004, AUGTR_0007, AUGTR_0013, AUGTR_0014, AUGTR_0017, AUGTR_0020, AUGTR_0022, AUGTR_0023, AUGTR_0027, AUGTR_0030 e AUGTR_0034. Entre os pares RAD com RPD superior a 20%, os intervalos AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0013, 11–12 m; e AUGTR_0034, 8–9 m coincidem com essa condição de borda geofísica. Essa coincidência sugere que zonas de transição podem favorecer maior variabilidade entre original e duplicata, possivelmente por mudanças laterais na proporção de minerais acessórios, fases fosfatadas, fases titaníferas ou minerais portadores de ETR. Contudo, anomalias geofísicas representam contrastes físicos ou geoquímicos e não devem ser interpretadas isoladamente como limites geológicos definitivos (Minty, 1997; Dentith; Mudge, 2014).

A borda geofísica, entretanto, não explica sozinha todas as discrepâncias. Os pares AUGTR_0016, 2–3 m, e AUGTR_0032, 6–7 m, também apresentaram RPD superior a 20% nos oito analitos avaliados, mas não foram destacados como localizados em bordas de resposta geofísica terrestre. Isso indica que a variabilidade das duplicatas RAD também pode ocorrer por heterogeneidade local dentro da unidade titanita-hornblendito, diferença de representatividade entre original e duplicata, variação granulométrica ou efeitos de homogeneização e quarteamento.

Os pares AUGTR_0007, AUGTR_0016 e AUGTR_0032 constituem os casos mais críticos, pois apresentaram discrepância superior a 20% em todos os analitos avaliados. Quando a diferença afeta simultaneamente TREO+Y, MREO, os óxidos de terras raras magnéticas, TiO_2 e P_2O_5, a hipótese mais consistente é a diferença de representatividade entre as frações comparadas, e não um problema isolado de leitura de um único elemento. Em contraste, os pares AUGTR_0013, 11–12 m, e AUGTR_0018, 5–6 m, apresentaram discrepância apenas

para P_2O_5, sugerindo variabilidade pontual associada ao componente fosfatado, possivelmente relacionada à distribuição irregular de apatita ou outros minerais fosfatados no material amostrado. Essa interpretação é compatível com o papel do P_2O_5 como óxido associado a fases fosfatadas em contextos carbonatíticos, metacarbonatíticos e alcalinos (Morales, 2017; Garcia, 2023; Vieira *et al*., 2025).

A análise de bias reforça essa leitura. Nas duplicatas SGS, os *bias* médios próximos de zero não indicam tendência sistemática relevante no controle laboratorial. Nas duplicatas RAD, foram observados *bias* médios positivos para TREO+Y, MREO e para os óxidos de terras raras magnéticas, indicando que, em média, as duplicatas de campo apresentaram valores superiores aos das amostras originais nesses analitos. No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois os desvios padrão elevados e a presença de poucos pares muito discrepantes indicam que o *bias* médio pode estar sendo influenciado por intervalos específicos, e não por uma tendência sistemática generalizada em todo o banco.

O P_2O_5 apresentou o comportamento mais sensível nas duplicatas RAD, combinando maior RPD médio, maior número de pares acima de 20%, bias médio positivo e maior inclinação da linha de tendência na avaliação de bias. Esse comportamento é coerente com o coeficiente de variação elevado observado no item 3.11 e sugere que o P_2O_5 é particularmente afetado pela variabilidade de campo. Como esse óxido está associado a fases fosfatadas, sua maior dispersão pode refletir distribuição irregular de minerais como apatita e outros acessórios no material de trado. O TiO_2 apresentou comportamento intermediário, com RPD médio inferior ao de P_2O_5, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, MREO e TREO+Y, além de bias médio negativo nas duplicatas RAD.

O método analítico também deve ser considerado na discussão da qualidade dos dados. As amostras do PTRP foram analisadas por métodos multielementares envolvendo preparação física, secagem, britagem, pulverização, homogeneização, fusão com metaborato de lítio e leitura por ICP-OES e ICP-MS. Para óxidos maiores e alguns elementos traço, foi utilizado o método ICP95A; para elementos terras raras e demais elementos traço em baixos teores, foi utilizado o método IMS95A, conforme os certificados analíticos da SGS Geosol e a metodologia descrita na seção 3.8 deste trabalho.

Embora a fusão com metaborato de lítio favoreça a abertura da matriz mineral e a solubilização de fases resistentes, todo método analítico possui limitações relacionadas à faixa de concentração, aos limites de detecção e quantificação, aos efeitos de matriz, à calibração, às

interferências instrumentais e à representatividade da alíquota analisada. Em avaliações de QA/QC, essas limitações devem ser consideradas porque a precisão dos resultados pode envolver incertezas associadas à subamostragem, à digestão e à análise, especialmente quando os teores estão próximos ao limite de detecção do método (Smee *et al*., 2024).

No presente estudo, entretanto, os resultados não indicam que o método analítico tenha sido a principal fonte da variabilidade observada. Se houvesse instabilidade analítica significativa, seria esperado que as duplicatas laboratoriais SGS também apresentassem maior dispersão, RPDs elevados ou *bias* sistemático. Contudo, os pares SGS apresentaram elevada concordância nos diagramas de dispersão, RPD médio inferior a 5% e bias próximo de zero para todos os analitos avaliados. Assim, embora as limitações inerentes ao método analítico devam ser reconhecidas, os resultados sugerem que as maiores discrepâncias estão mais associadas às duplicatas de campo RAD, refletindo principalmente representatividade amostral, heterogeneidade do material de trado, localização em zonas de transição e etapas de homogeneização e quarteamento.

Por fim, a interpretação deve considerar o número limitado de pares disponíveis. Stanley e Lawie (2007) destacam que medidas relativas de erro em dados geoquímicos pareados devem ser interpretadas com cautela quando o número de pares é pequeno ou quando há grande variabilidade entre amostras. Smee *et al*. (2024) também reforçam que a avaliação de duplicatas deve considerar o método de coleta, o tipo de material, a correta vinculação entre amostra primária e duplicata e a finalidade do programa de QA/QC. Assim, os resultados deste trabalho devem ser entendidos como um diagnóstico exploratório da qualidade do banco geoquímico tratado, e não como avaliação definitiva de todas as fontes de incerteza do sistema amostral.

De forma integrada, os resultados indicam que o banco geoquímico tratado apresenta boa consistência laboratorial, sustentada pelo desempenho das duplicatas SGS. As principais limitações estão concentradas nas duplicatas de campo RAD, especialmente em poucos pares e intervalos específicos. Parte dessas discrepâncias coincide com furos posicionados em bordas de anomalias geofísicas terrestres, como AUGTR_0007, AUGTR_0013 e AUGTR_0034, enquanto outras ocorrem fora dessas bordas, indicando também influência da heterogeneidade local da unidade titanita-hornblendito e das etapas de preparação inicial. Assim, a avaliação integrada não invalida o banco geoquímico do PTRP; ao contrário, permite reconhecer seus pontos fortes e suas limitações. O banco pode ser utilizado em interpretações exploratórias

futuras, desde que os pares RAD discrepantes permaneçam sinalizados e sejam interpretados com cautela em análises geoquímicas, espaciais e litológicas posteriores.

4.7 Implicações para o PTRP

Os resultados da avaliação de QA/QC indicam que o banco geoquímico tratado do PTRP apresenta consistência suficiente para subsidiar interpretações exploratórias preliminares, desde que seus pontos de atenção sejam considerados. Essa interpretação se baseia principalmente no comportamento das duplicatas laboratoriais SGS, que apresentaram elevada concordância nos diagramas de dispersão, baixos valores médios de RPD, ausência de pares com RPD superior a 20% e bias próximo de zero. Em termos práticos, esses resultados indicam boa repetibilidade laboratorial para TREO+Y, MREO, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5, conforme os princípios de avaliação de dados pareados discutidos por Sinclair e Blackwell (2002), Abzalov (2016) e Smee *et al*. (2024).

A principal limitação do banco está associada às duplicatas de campo RAD. Nesse grupo, ocorreram os maiores valores médios de RPD e todos os pares com RPD superior a 20%. Essa diferença em relação às duplicatas SGS é coerente com a função das duplicatas de campo, que incorporam maior número de fontes de variação, incluindo coleta, divisão do material, homogeneização, quarteamento, granulometria, preparação inicial e heterogeneidade natural da amostra. Assim, os pares RAD discrepantes não indicam, por si só, instabilidade laboratorial, mas sim intervalos que exigem cautela interpretativa quanto à representatividade amostral (Abzalov, 2016; CIM, 2018; Smee *et al*., 2024).

Os intervalos com RPD entre >10% e 20% representam pontos de atenção moderada. Esses valores não configuram discrepâncias críticas, mas indicam pares que devem ser observados quando utilizados em interpretações geoquímicas, especialmente em áreas anômalas ou em zonas de maior variabilidade espacial. Nas duplicatas RAD, essa condição aparece em intervalos como AUGTR_0011, 2–3 m; AUGTR_0018, 5–6 m; AUGTR_0030, 1–2 m; AUGTR_0034, 8–9 m; AUGTR_0041, 1–2 m; e AUGTR_0043, 5–6 m, variando conforme o analito avaliado. A leitura desses valores deve considerar o tipo de duplicata, a faixa de teor e o comportamento do par nos demais métodos aplicados, como recomendado para dados geoquímicos pareados (Stanley; Lawie, 2007; Abzalov, 2016; Smee *et al*., 2024).

Os intervalos com RPD superior a 20% constituem os principais pontos de atenção do banco geoquímico tratado. No conjunto avaliado, essas ocorrências ficaram restritas às duplicatas de campo RAD, totalizando 36 ocorrências analito-par concentradas em 8 pares original–duplicata. Os casos mais críticos são AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; e AUGTR_0032, 6–7 m, pois apresentaram RPD superior a 20% nos oito analitos avaliados. Como a discrepância afeta simultaneamente os somatórios TREO+Y e MREO, os óxidos de terras raras magnéticas, TiO_2 e P_2O_5, esses pares indicam diferença ampla de representatividade entre original e duplicata de campo, e não apenas variação isolada de um único analito (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; Smee *et al*., 2024).

Outros intervalos apresentam implicações mais específicas. AUGTR_0013, 11–12 m, e AUGTR_0018, 5–6 m, concentraram discrepância principalmente em P_2O_5, sugerindo atenção ao componente fosfatado. Essa resposta pode refletir distribuição irregular de fases como apatita ou outros minerais acessórios no material de trado, interpretação compatível com o papel do P_2O_5 como óxido associado a fases fosfatadas em contextos carbonatíticos, metacarbonatíticos e alcalinos da região (Morales, 2017; Garcia, 2023; Vieira *et al*., 2025). Já AUGTR_0043, 5–6 m, concentra atenção nos somatórios e nos principais óxidos de terras raras magnéticas, enquanto AUGTR_0041, 1–2 m, representa um caso pontual, próximo ao limite adotado.

A localização espacial dos pares também influencia a forma como esses dados devem ser utilizados no PTRP. Parte dos intervalos discrepantes coincide com furos posicionados em bordas de anomalias geofísicas terrestres, como AUGTR_0007, AUGTR_0013 e AUGTR_0034. Essa relação sugere que zonas de transição podem apresentar maior variabilidade entre original e duplicata, possivelmente por mudanças laterais na proporção de minerais portadores de ETR, fases fosfatadas e fases titaníferas. Entretanto, como anomalias geofísicas representam contrastes físicos ou geoquímicos e não limites geológicos definitivos, essa interpretação deve permanecer integrada aos dados litológicos, geoquímicos e de campo (Minty, 1997; Dentith; Mudge, 2014; Abzalov, 2016).

A ocorrência de pares críticos fora das bordas geofísicas destacadas, como AUGTR_0016, 2–3 m, e AUGTR_0032, 6–7 m, mostra que a variabilidade não pode ser atribuída apenas à posição espacial em bordas de anomalias. Esses casos indicam que a heterogeneidade interna da unidade titanita-hornblendito, a granulometria do material de trado e os procedimentos de homogeneização e quarteamento também podem influenciar a diferença

entre original e duplicata. Dessa forma, o uso futuro do banco deve considerar simultaneamente a posição dos pares QA/QC, a unidade litológica, os analitos afetados e o tipo de duplicata avaliado (Abzalov, 2016; CIM, 2018; Smee *et al*., 2024).

O método analítico também compõe a cadeia de interpretação dos dados. As amostras foram analisadas por métodos multielementares com fusão por metaborato de lítio e leitura por ICP-OES e ICP-MS, utilizando ICP95A para óxidos maiores e alguns elementos traço, e IMS95A para elementos terras raras e demais elementos traço em baixos teores. Apesar das limitações inerentes a qualquer método analítico, como faixa de concentração, limites de detecção e quantificação, efeitos de matriz, calibração e representatividade da alíquota analisada, os resultados das duplicatas SGS não indicam que a etapa analítica tenha sido a principal fonte de variabilidade. A maior discrepância observada nas duplicatas RAD aponta para influência mais forte da representatividade amostral e das etapas de campo e preparação inicial (Stanley; Lawie, 2007; Abzalov, 2016; Smee *et al*., 2024).

Dessa forma, a principal implicação para o PTRP é que o banco geoquímico tratado pode ser utilizado em interpretações exploratórias, desde que os intervalos de atenção permaneçam identificados. Os dados são adequados para apoiar o reconhecimento de padrões geoquímicos, a comparação com respostas geofísicas e a seleção preliminar de áreas de interesse. Contudo, os pares RAD com RPD entre >10% e 20% devem ser tratados como pontos de monitoramento, e os pares com RPD superior a 20% como intervalos de cautela interpretativa. Essa distinção permite utilizar o banco de forma crítica, sem descartar automaticamente informações potencialmente relevantes e sem aplicar de forma acrítica pares que apresentaram baixa reprodutibilidade de campo (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; CIM, 2018).

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Este trabalho avaliou a aquisição, o tratamento e a qualidade dos dados geoquímicos do PTRP, com foco nos óxidos de terras raras magnéticas Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3 e Tb_4O_7, nos somatórios MREO e TREO+Y, e nos óxidos maiores associados TiO_2 e P_2O_5. A partir da organização do banco geoquímico, da conversão dos elementos para óxidos e da identificação dos pares original–duplicata, foi possível avaliar a repetibilidade e a reprodutibilidade dos dados por meio de diagramas de dispersão, RPD, análise de pares discrepantes e avaliação de bias.

A organização do banco de dados permitiu preservar a rastreabilidade entre furos, intervalos amostrados, códigos de amostras, duplicatas de campo RAD e duplicatas laboratoriais SGS. Essa etapa foi fundamental para garantir que as comparações entre original e duplicata fossem realizadas de forma consistente, evitando interpretações baseadas em pares mal vinculados ou em dados sem controle de origem.

Os diagramas de dispersão indicaram comportamento distinto entre os dois tipos de duplicata. As duplicatas laboratoriais SGS apresentaram elevada concordância com as amostras originais, com pares próximos à reta X=Y e coeficientes de determinação superiores a 0,98 para todos os analitos avaliados. As duplicatas de campo RAD também apresentaram correlação positiva entre original e duplicata, porém com maior dispersão em relação à reta de concordância, principalmente em determinados furos e intervalos.

A avaliação por RPD confirmou esse contraste. Nas duplicatas SGS, todos os analitos apresentaram RPD médio inferior a 5%, variando de 1,82% para TiO_2 a 4,19% para Nd_2O_3, sem ocorrência de pares com RPD superior a 20%. Esse resultado indica boa repetibilidade laboratorial para os oito analitos avaliados.

Nas duplicatas RAD, os maiores RPDs médios ocorreram em P_2O_5, com 26,99%; Pr_6O_{11}, com 22,97%; Nd_2O_3, com 21,15%; MREO, com 21,05%; e TREO+Y, com 20,62%. Esses valores evidenciam maior variabilidade associada ao controle de campo, especialmente nos analitos mais sensíveis à heterogeneidade do material de trado e à representatividade amostral.

A análise dos pares com RPD superior a 20% mostrou que as maiores discrepâncias ficaram restritas às duplicatas de campo RAD. Ao todo, foram identificadas 36 ocorrências analito-par acima desse limite, concentradas em 8 pares original–duplicata. Os casos mais

críticos foram AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; e AUGTR_0032, 6–7 m, que apresentaram RPD superior a 20% nos oito analitos avaliados. Esses intervalos indicam diferença ampla de representatividade entre original e duplicata de campo.

Entre os demais pares com RPD superior a 20%, AUGTR_0013, 11–12 m, e AUGTR_0018, 5–6 m, apresentaram discrepância concentrada em P_2O_5, com RPD máximo de 68,24% e 51,67%, respectivamente. O intervalo AUGTR_0034, 8–9 m, apresentou cinco analitos acima de 20%, com RPD máximo de 59,93%. O intervalo AUGTR_0043, 5–6 m, apresentou quatro analitos acima de 20%, enquanto AUGTR_0041, 1–2 m, apresentou apenas TREO+Y acima desse limite, com RPD máximo de 21,41%.

A análise de *bias* complementou os resultados obtidos nos diagramas de dispersão e no RPD. As duplicatas SGS apresentaram *bias* próximo de zero, sem indicação de tendência sistemática relevante. Nas duplicatas RAD, foram observadas *bias* médias positivas para TREO+Y, MREO e para os óxidos de terras raras magnéticas, sugerindo que, em alguns pares, as duplicatas de campo apresentaram valores superiores aos das amostras originais. Entretanto, esse comportamento foi influenciado por poucos intervalos discrepantes, não caracterizando necessariamente uma tendência sistemática generalizada em todo o banco.

A discussão integrada indicou que a variabilidade observada nas duplicatas RAD está mais associada à representatividade amostral, à heterogeneidade natural do material de trado, à distribuição irregular de minerais acessórios e às etapas de homogeneização e quarteamento do que a uma instabilidade analítica laboratorial. Essa interpretação é reforçada pelo desempenho das duplicatas SGS, que apresentaram baixa dispersão, baixos RPDs e bias próximo de zero.

A localização espacial dos pares QA/QC mostrou que parte dos intervalos discrepantes ocorre em bordas de anomalias geofísicas terrestres, como AUGTR_0007, AUGTR_0013 e AUGTR_0034. Essa relação sugere que zonas de transição geofísica ou litológica podem contribuir para maior variabilidade entre original e duplicata. Entretanto, a ocorrência de pares críticos fora dessas bordas, como AUGTR_0016 e AUGTR_0032, indica que a heterogeneidade interna da unidade titanita-hornblendito também deve ser considerada na interpretação dos dados.

Entre os analitos avaliados, o P_2O_5 apresentou o comportamento mais sensível à variabilidade de campo, com o maior RPD médio nas duplicatas RAD, maior número de pares acima de 20% e comportamento destacado na análise de bias. Essa resposta é compatível com

a possível distribuição heterogênea de fases fosfatadas no material amostrado. Os óxidos Pr_6O_{11} e Nd_2O_3 também apresentaram maior variabilidade nas duplicatas RAD, influenciando diretamente o comportamento do MREO.

Conclui-se que o banco geoquímico tratado do PTRP apresenta boa consistência analítica laboratorial e é adequado para subsidiar interpretações exploratórias, como o reconhecimento de padrões geoquímicos, a comparação com respostas geofísicas e a seleção de áreas de interesse. Essa consistência é sustentada principalmente pelas duplicatas laboratoriais SGS, que apresentaram elevada concordância com as amostras originais, baixos valores médios de RPD, ausência de pares com RPD superior a 20% e bias próximo de zero para os analitos avaliados.

As duplicatas de campo RAD apresentaram maior variabilidade relativa, concentrada em poucos pares original–duplicata e em intervalos específicos. Essa variação está associada principalmente à representatividade amostral, à heterogeneidade do material de trado, à possível distribuição heterogênea de minerais portadores dos analitos avaliados e às etapas de homogeneização e quarteamento. Dessa forma, a avaliação de QA/QC qualificou o banco geoquímico do PTRP, permitindo diferenciar a variabilidade de campo da consistência analítica laboratorial e sinalizar intervalos relevantes para apoiar a interpretação geoquímica e as próximas etapas de investigação.

5.2 Recomendações

Com base nos resultados obtidos, as próximas etapas do PTRP devem utilizar o banco geoquímico tratado como base para interpretações exploratórias, mantendo os critérios de rastreabilidade, controle de qualidade e sinalização dos pares original–duplicata estabelecidos neste trabalho.

A continuidade do programa de QA/QC é indicada para as próximas campanhas, com a manutenção da separação entre duplicatas de campo e duplicatas laboratoriais. Essa distinção é importante porque cada tipo de duplicata avalia fontes diferentes de variação: as duplicatas de campo refletem a precisão global do processo amostral, enquanto as duplicatas laboratoriais avaliam principalmente a repetibilidade da preparação e da análise em laboratório (Abzalov, 2016; CIM, 2018; Smee et al., 2024).

Também é importante preservar, de forma padronizada, o vínculo entre amostra original, duplicata, tipo de controle, furo, intervalo, litologia, certificado analítico, método utilizado e analitos avaliados. A manutenção dessa rastreabilidade fortalece o banco geoquímico e permite futuras conferências, auditorias, reprocessamentos estatísticos e integrações com novos dados de campo, geofísica e mineralogia (Sinclair; Blackwell, 2002; CIM, 2018).

Os pares RAD com RPD >10% e ≤20% devem ser mantidos como pontos de acompanhamento no controle de qualidade, enquanto os pares com RPD >20% devem permanecer sinalizados no banco de dados para avaliação dirigida. Merecem atenção especial os intervalos AUGTR_0007, 4–5 m; AUGTR_0016, 2–3 m; e AUGTR_0032, 6–7 m, por apresentarem discrepância superior a 20% nos oito analitos avaliados. Esses dados não devem ser excluídos automaticamente; ao contrário, podem ser utilizados como pontos de verificação para checagem litológica, reamostragem localizada, avaliação da homogeneização e comparação com respostas geofísicas, quando necessário (Stanley; Lawie, 2007; Abzalov, 2016; Smee et al., 2024).

Para os intervalos AUGTR_0013, 11–12 m, e AUGTR_0018, 5–6 m, a atenção deve ser direcionada principalmente ao comportamento do P_2O_5, uma vez que as discrepâncias foram mais concentradas nesse óxido. Como o P_2O_5 pode estar associado a fases fosfatadas, como apatita e outros minerais acessórios, esses intervalos podem ser priorizados em avaliações mineralógicas futuras e em comparações com áreas anômalas do projeto (Morales, 2017; Garcia, 2023; Vieira et al., 2025).

A integração dos intervalos sinalizados em ambiente SIG pode contribuir para a comparação entre dados geoquímicos, anomalias geofísicas, unidades litológicas, cintilometria terrestre e futuros levantamentos de campo. Essa abordagem é especialmente relevante nos pares localizados próximos a bordas de respostas geofísicas, como AUGTR_0007, AUGTR_0013 e AUGTR_0034, pois anomalias geofísicas representam contrastes físicos ou geoquímicos e não limites geológicos definitivos (Minty, 1997; Dentith; Mudge, 2014).

A unidade titanita-hornblendito deve ser avaliada com maior detalhamento em estudos futuros, considerando sua heterogeneidade interna e sua possível influência na repetibilidade das duplicatas de campo. Para isso, podem ser observados fatores como profundidade dos intervalos, granulometria do material de trado, proporção de solo, regolito e fragmentos de

rocha, além da distribuição de minerais portadores de ETR, fases fosfatadas e fases titaníferas (Abzalov, 2016; Smee et al., 2024).

Estudos mineralógicos complementares também podem auxiliar na compreensão dos intervalos mais discrepantes, especialmente AUGTR_0007, AUGTR_0016, AUGTR_0032, AUGTR_0013 e AUGTR_0034. Técnicas como lupa binocular, microscopia petrográfica, MEV-EDS, difração de raios X ou química mineral podem contribuir para identificar as fases responsáveis pelas variações de Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Dy_2O_3, Tb_4O_7, TiO_2 e P_2O_5 (Morales, 2017; Garcia, 2023; Vieira et al., 2025).

Por fim, o banco geoquímico tratado pode ser utilizado no reconhecimento de padrões geoquímicos, na seleção de áreas de interesse, na comparação com dados geofísicos e no planejamento de campanhas futuras. Para aplicações mais avançadas, como definição formal de domínios geoquímicos, modelagem espacial ou estimativas exploratórias, é indicado ampliar a malha amostral, aumentar o número de controles QA/QC e avaliar a continuidade espacial dos teores (Sinclair; Blackwell, 2002; Abzalov, 2016; CIM, 2018).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABZALOV, M. Applied mining geology. Cham: Springer, 2016.

ADAMS, J. A. S.; GASPARINI, P. Gamma-ray spectrometry of rocks. Amsterdam: Elsevier, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Minerais críticos e estratégicos. Brasília, DF: ANM, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/minerais-criticos-e-estrategicos. Acesso em: 20 maio 2026.

ALMEIDA, D. P. M. de; CHEMALE JR., F.; MACHADO, A. Late to post-orogenic Brasiliano-Pan-African volcano-sedimentary basins in the Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil. Petrology: new perspectives and applications, v. 5, p. 73-105, 2012.

ARENA, K. R.; HARTMANN, L. A.; LANA, C. Evolution of Neoproterozoic ophiolites from the southern Brasiliano Orogen revealed by zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry. Precambrian Research, v. 285, p. 299-314, 2016.

BABINSKI, M. *et al*. Juvenile accretion at 750-700 Ma in southern Brazil. Geology, v. 24, n. 5, p. 439-442, 1996.

BALARAM, V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geoscience Frontiers, v. 10, n. 4, p. 1285-1303, 2019.

BAO, Z.; ZHAO, Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. Ore Geology Reviews, v. 33, n. 3-4, p. 519-535, 2008. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2007.03.005.

BARAKOS, G.; MISCHO, H. A review of misleading methods and biased practices in evaluating the feasibility of rare earth mining projects. In: SOMP ANNUAL MEETING AND CONFERENCE, 28., 2017, Torino. Proceedings [...]. Torino: GEAM - Associazione Georisorse e Ambiente, 2017.

BITENCOURT, M. F.; HARTMANN, L. A. Geoquímica das rochas anfibolíticas da região de Caçapava do Sul, RS: parte I: caracterização geológica e petrográfica, elementos maiores e menores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984a. p. 4266-4278.

BITENCOURT, M. F.; HARTMANN, L. A. Geoquímica das rochas anfibolíticas da região de Caçapava do Sul, RS: parte II: elementos traço e considerações genéticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984b. p. 4253-4265.

CANADIAN INSTITUTE OF MINING, METALLURGY AND PETROLEUM. CIM mineral exploration best practice guidelines. Westmount: CIM, 2018.

CANADIAN SECURITIES ADMINISTRATORS. National Instrument 43-101: standards of disclosure for mineral projects. [S. l.]: Canadian Securities Administrators, 2023.

CERVA-ALVES, T. Geologia dos carbonatitos ediacaranos de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; REGUIR, E. P.; ZAITSEV, A. N.; COUESLAN, C.; XU, C.; KYNICKÝ, J.; MUMIN, A. H.; YANG, P. Apatite in carbonatitic rocks: compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. Lithos, v. 274-275, p. 188-213, 2017.

CHEMALE JR., F. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2000.

CHEMALE JR., F.; HARTMANN, L. A.; SILVA, L. D. Stratigraphy and tectonism of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. Communications of the Geological Survey of Namibia, n. 10, p. 151-166, 1995.

CRUZ, R. F. da. Escudo Sul-Rio-Grandense: geologia e recursos minerais da folha Lavras do Sul - SH.22-YA-IV. Brasília, DF: CPRM, 2022.

CRUZ, R. F. da; HORN, B. L. D.; IGLESIAS, C. M. da F. Carta geológica: folha SH.22-Y-A-V, Caçapava do Sul. Brasília, DF: SGB/CPRM, 2025.

DE TONI, G. B. *et al*. Anatomy of the transpressional Dom Feliciano Belt and its pre-collisional isotopic (Sr-Nd) signatures: a contribution towards an integrated model for the Brasiliano/Pan-African orogenic cycle. Gondwana Research, v. 125, p. 180-209, 2024.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. Geophysics for the mineral exploration geoscientist. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

EUROPEAN COMMISSION. Critical raw materials. Brussels: European Commission, 2023. Disponível em: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en. Acesso em: 10 maio 2026.

FAMBRINI, G. L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO CESAR, A. R. S. Estratigrafia e evolução paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Ocidental, Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Geociências, v. 36, n. 3, p. 550-565, 2006.

FERNANDES, L. A. D.; TOMMASI, A.; PORCHER, C. C. Deformation patterns in the southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: a reappraisal. Journal of South American Earth Sciences, v. 5, p. 77-96, 1992.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Tectônica de placas no Ciclo Brasiliano: as orogenias dos Cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. 1991. 366 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

GARCIA, L. M. Prospecção de carbonatitos na região sul do Granito Caçapava - RS: ênfase em mapeamento geológico e química mineral para ETRs, Nb e P. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2023.

GEBOY, N. J.; ENGLE, M. A. Quality assurance and quality control of geochemical data: a primer for the research scientist. Reston: U.S. Geological Survey, 2011. Open-File Report 2011-1187.

GOMES, C. H.; BRIOSCHI NETO, P.; MARQUES, G. A.; DIAS, G. P.; SPERANDIO, D. G. Soil geochemistry adjacent to carbonatites from Caçapava do Sul, RS, by fluorescence of X-rays by dispersive energy. Geociências, São Paulo, v. 39, n. 4, p. 953-963, 2020.

GUBERT, M.; PHILIPP, R. P.; BASEI, M. A. S. Geochronology of the Bossoroca Complex, São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil: tectonic implications for a Neoproterozoic São Gabriel Arc. Journal of South American Earth Sciences, v. 70, p. 1-17, 2016.

HARTMANN, L. A. *et al*. Time frame of 753-680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazilian Shield. Gondwana Research, v. 19, n. 1, p. 84-99, 2011.

HENDERSON, P. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984.

HOERLLE, G. S. *et al*. Metasomatic reactions triggered by localized and dynamically evolving fluid flux record multistage intrusion history: an example from the syntectonic Caçapava do Sul Granitic Complex, Southern Brazil. Lithos, v. 442-443, artigo 107103, 2023. DOI: 10.1016/j.lithos.2023.107103.

HOERLLE, G. S.; REMUS, M. V. D.; DANI, N. Metamafic dyke and sill swarms in the Dom Feliciano Belt: insights for post-collisional strike-slip tectonics and fluid-assisted metamorphism. Journal of South American Earth Sciences, 2022.

HORN, B. L. D.; IGLESIAS, C. M. da F.; LAUX, J. H.; CRUZ, R. F. da; KLEIN, C. Projeto Geologia e Potencial Mineral da Porção NW do Escudo Sul. Brasília, DF: SGB/CPRM, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global critical minerals outlook 2025. Paris: IEA, 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY; COMMISSION ON ISOTOPIC ABUNDANCES AND ATOMIC WEIGHTS. Atomic weights of the elements 2023. [S. l.]: IUPAC/CIAAW, 2023.

JAMES COOK UNIVERSITY. Element-to-stoichiometric oxide conversion factors. Townsville: Advanced Analytical Centre, [s. d.].

JOINT ORE RESERVES COMMITTEE. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves: the JORC Code. 2012 ed. Carlton South: JORC, 2012.

KLINGER, J. M. A historical geography of rare earth elements: from discovery to the atomic age. The Extractive Industries and Society, v. 2, n. 3, p. 572-580, 2015.

KONOPÁSEK, J. *et al*. Did the circum-Rodinia subduction trigger the Neoproterozoic rifting along the Congo-Kalahari Craton margin? International Journal of Earth Sciences, v. 107, p. 1859-1894, 2018.

LE MAITRE, R. W. *et al*. (ed.). Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

LEITE, J. A. D. *et al*. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. International Geology Review, v. 40, n. 8, p. 688-705, 1998.

DE LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S. The Lavras do Sul Shoshonitic Association: implications for the origin and evolution of Neoproterozoic shoshonitic magmatism in southernmost Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 11, n. 1, p. 67-77, 1998.

LONG, K. R.; VAN GOSEN, B. S.; FOLEY, N. K.; CORDIER, D. The principal rare earth elements deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective. Reston: U.S. Geological Survey, 2010. Scientific Investigations Report 2010-5220.

LOPES, C. G. *et al*. Provenance of the Passo Feio Complex, Dom Feliciano Belt: implications for the age of supracrustal rocks of the São Gabriel Arc, southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences, v. 58, p. 9-17, 2015.

MATTÉ, V. *et al*. Rochas dioríticas do Platô da Ramada, Rio Grande do Sul, e sua relação com o vulcanismo alcalino da Formação Acampamento Velho, Neoproterozoico do Escudo Sul-Rio-Grandense. Revista Brasileira de Geociências, v. 42, n. 2, p. 343-362, 2012.

MILLER, J. N.; MILLER, J. C.; MILLER, R. D. Statistics and chemometrics for analytical chemistry. 7. ed. Harlow: Pearson Education, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Minerais críticos do Brasil: guia para investidores estrangeiros. Brasília, DF: MME, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/guia-investidor-minerais-criticos. Acesso em: 20 maio 2026.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, p. 39-50, 1997.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for engineers. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

MORALES, B. A. de A. Petrologia do carbonatito Passo Feio, ênfase no comportamento dos ETR, Caçapava do Sul - RS. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.

MYERS, J. C. Geostatistical error management: quantifying uncertainty for environmental sampling and mapping. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997.

NARDI, L. V. S.; BITENCOURT, M. de F. Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. Revista Brasileira de Geociências, v. 19, n. 2, p. 153-169, 1989.

NEIS, L. P. Geoquímica de metacarbonatos do Escudo Sul-rio-grandense na região de Caçapava do Sul e Arroio Grande, RS. 2013. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ORIOLO, S. *et al*. Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: implications for the supercontinent cycle. Geoscience Frontiers, v. 8, n. 6, p. 1431-1445, 2017.

PARISI, G. N. Geoquímica elementar com ênfase em elementos terras raras em mármores do Bloco São Gabriel no Escudo Sul-rio-grandense. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018.

PERTILLE, J. *et al*. Reconstructing the Cryogenian-Ediacaran evolution of the Porongos fold and thrust belt, Southern Brasiliano Orogen, based on zircon U-Pb-Hf-O isotopes. International Geology Review, v. 59, n. 12, p. 1532-1560, 2017.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; BASEI, M. A. S. The tectonic evolution of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, southern Brazil: the closure of the Charrua Ocean. In: Geology of Southwest Gondwana. Cham: Springer, 2018. p. 243-265.

PHILIPP, R. P. *et al*. U-Pb detrital zircon dating applied to metavolcano-sedimentary complexes of the São Gabriel Terrane: new constraints on the evolution of the Dom Feliciano Belt. Journal of South American Earth Sciences, v. 110, artigo 103409, 2021.

PHOSCO LTD. Chaketma Phosphate Project: scoping study. [S. l.]: PhosCo Ltd., 2022.

PIERCEY, Stephen J. Modern analytical facilities 2: a review of Quality Assurance and Quality Control (QA/QC) procedures for lithogeochemical data. **Geoscience Canada**, v. 41, n. 1, p. 75-88, 2014.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. C. Cachoeira do Sul: folha SH.22-Y-A. Porto Alegre: CPRM, 2000.

REFERENCIAL GEOLOGIA. Mapeamento geológico local do Projeto Terras Raras do Pampa (PTRP), Caçapava do Sul, RS. Caçapava do Sul: Referencial Geologia, 2015-2026. Relatório técnico interno.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRETT, R. G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. Science of the Total Environment, v. 346, n. 1-3, p. 1-16, 2005.

REMUS, M. V. D. *et al*. Garnet zonation and monazite ages as monitors of contrasting metamorphic evolution in the Brasiliano schist belts of southern Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45., 2010, Belém. Anais [...]. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 2010.

REMUS, M. V. D. *et al*. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano cycle in southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences, v. 13, p. 191-216, 2000.

RESOURO STRATEGIC METALS INC. PEA for Resouro's Tiros Project outlines strong economics with after-tax NPV8 of US$714.9M and IRR of 44.2%. [S. l.]: Resouro Strategic Metals Inc., 2026.

ROSE, A. W.; HAWKES, H. E.; WEBB, J. S. Geochemistry in mineral exploration. 2. ed. London: Academic Press, 1979.

SARTORI, P. L.; RÜEGG, N. R. O Complexo Granítico de São Sepé, Rio Grande do Sul e a evolução das rochas graníticas da região orogênica do Sudeste. Boletim IG, v. 10, p. 69-77, 1979.

SERRA VERDE. Serra Verde enters commercial production. Minaçu: Serra Verde, 2024. Disponível em: https://svpm.com.br/en/serra-verde-enters-commercial-production/. Acesso em: 5 jun. 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta geológica da Folha Caçapava do Sul - SH.22-Y-A-V. Brasília, DF: SGB/CPRM, 2025.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. Applied mineral inventory estimation. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

SIVIERO, R. S. *et al*. Complexo básico-ultrabásico Pedras Pretas, RS: uma síntese petrológica e geoquímica. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 8., 1996, Porto Alegre. Livro de resumos [...]. Porto Alegre: UFRGS, 1996.

SMEE, B. W.; BLOOM, L.; ARNE, D.; HEBERLEIN, D. Practical applications of quality assurance and quality control in mineral exploration, resource estimation and mining programmes: a review of recommended international practices. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, v. 24, n. 2, artigo geochem2023-046, 2024.

SOUZA, T. L. Gênese dos serpentinitos e esteatitos do Complexo Passo Feio (RS-Brasil): evidências mineralógicas, geoquímicas e isotópicas. 2020. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

STANLEY, C. R.; LAWIE, D. Average relative error in geochemical determinations: clarification, calculation, and a plea for consistency. Exploration and Mining Geology, v. 16, n. 3-4, p. 265-274, 2007.

UNITED NATIONS. The Secretary-General's Initiative on Critical Energy Transition Minerals. New York: United Nations, 2024. Disponível em: https://www.un.org/en/climatechange/critical-minerals. Acesso em: 20 abr. 2026.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2025: rare earths. Reston: U.S. Geological Survey, 2025. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earths.pdf. Acesso em: 15 abr. 2026.

VERPLANCK, P.; LOWERS, H. A.; BOEHLKE, A.; THOMPSON, J. M.; BHAT, G.; MERCER, C. M. The Mount Weld rare earth element deposit, Western Australia: a carbonatite-derived laterite. In: SGA BIENNIAL MEETING, 17., 2023, Zurich. Proceedings [...]. Zurich: Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 2023. v. 3, p. 236-239.

VERPLANCK, P. L.; MARIANO, A. N.; MARIANO JUNIOR, A. Rare earth element ore geology of carbonatites. In: VERPLANCK, P. L.; HITZMAN, M. W. (ed.). Rare earth and critical elements in ore deposits. Littleton: Society of Economic Geologists, 2016. p. 5-32. Reviews in Economic Geology, v. 18.

VERPLANCK, P. L.; VAN GOSEN, B. S. Carbonatite and alkaline intrusion-related rare earth element deposits: a deposit model. Reston: U.S. Geological Survey, 2011.

VIEIRA, D. T.; KOESTER, E.; ROSA, M. B. da; MIRONUK, L.; ALMEIDA, D. del P. M. de; CEDEÑO, D. G.; RAMOS, R. C.; BASTOS, V. A.; CAON, L. Minerais ricos em elementos terras raras (REE) do Metacarbonatito Passo Feio, Cinturão Dom Feliciano, Brasil: microscopia e microanálise por sonda eletrônica. Revista de Geociências do Nordeste, v. 11, n. 2, p. 60-77, 2025. DOI: 10.21680/2447-3359.2025v11n2ID40118.

WANG, Z.; FAN, H.; ZHOU, L.; YANG, K.; SHE, H. Carbonatite-related REE deposits: an overview. Minerals, v. 10, n. 11, artigo 965, 2020. DOI: 10.3390/min10110965.

XU, C.; KYNICKÝ, J.; SMITH, M. P.; KOPRIVA, A.; BRTNICKÝ, M.; URUBEK, T.; YANG, Y.; ZHAO, Z.; HE, C.; SONG, W. Origin of heavy rare earth mineralization in South China. Nature Communications, v. 8, artigo 14598, 2017. DOI: 10.1038/ncomms14598.

APÊNDICE A – Síntese das principais referências utilizadas no estado da arte

Este apêndice apresenta a síntese ampliada das principais referências utilizadas no Estado da Arte, com indicação do tipo de publicação, foco principal e contribuição para o presente trabalho.

Autor / ano	Tipo de referência	Foco principal	Contribuição para este trabalho
Long *et al*. (2010)	Relatório técnico	Depósitos de terras raras e uso de TREO	Apoia a apresentação dos dados geoquímicos na forma de óxidos e o uso de somatórios como TREO em projetos de ETR.
Verplanck, Mariano e Mariano (2016)	Capítulo de livro	ETR em carbonatitos	Contextualiza carbonatitos e seus produtos de alteração como fontes globais relevantes de elementos terras raras.
Wang *et al*. (2020)	Artigo de revisão	Depósitos de ETR relacionados a carbonatitos	Reforça a importância dos carbonatitos e complexos alcalinos na concentração de ETR, Nb, P, Ti e Th.
Balaram (2019)	Artigo de revisão	Aplicações, ocorrência, exploração e análise de ETR	Contribui para a contextualização geral das terras raras, suas aplicações tecnológicas e métodos de investigação geoquímica.
Bao e Zhao (2008)	Artigo científico	ETR em crostas de alteração sobre rochas graníticas	Reforça a importância de materiais intemperizados, solos, regolitos e crostas de alteração em estudos exploratórios de ETR.
Barakos e Mischo (2017)	Artigo de revisão / conferência	Avaliação de projetos de ETR e práticas problemáticas em estudos de viabilidade	Reforça a complexidade econômica e metodológica de projetos de terras raras, destacando a necessidade de clareza na apresentação de métricas como REO, produtos de ETR, cut-off grade e preço de cesta.
Xu *et al*. (2017)	Artigo científico	Mineralização de terras raras pesadas no sul da China	Demonstra a relevância de processos supergênicos e perfis de alteração na concentração de ETR, especialmente HREE e Y.
Verplanck *et al*. (2023)	Trabalho técnico	Mount Weld como laterita derivada de carbonatito	Fornece exemplo internacional de depósito de ETR associado a enriquecimento supergênico sobre carbonatito.
Serra Verde (2024)	Fonte institucional	Depósito Pela Ema e produção de ETR em argilas iônicas	Fornece exemplo brasileiro atual de produção de terras raras, com destaque para Nd, Pr, Dy e Tb.
Neis (2013)	Trabalho regional	Metacarbonatos no Escudo Sul-rio-grandense	Contribui para o entendimento da variabilidade geoquímica das rochas carbonáticas regionais.
Parisi (2018)	Trabalho regional	Mármores do Bloco São Gabriel	Apoia o entendimento de ETR em mármores calcíticos e dolomíticos do Bloco São Gabriel.
Cerva-Alves (2017)	Trabalho regional	Carbonatitos em Caçapava do Sul	Fornece base geológica regional para ETR, rochas carbonáticas e integração entre geoquímica de solos, aerogamaespectrometria e mapeamento.
Morales (2017)	Trabalho regional	Carbonatito Passo Feio	Contribui para o contexto mineralógico e geoquímico local, especialmente pela descrição

Autor / ano	Tipo de referência	Foco principal	Contribuição para este trabalho
			de apatita, monazita e minerais portadores de ETR.
Gomes *et al*. (2020)	Trabalho regional	Geoquímica de solos adjacentes a carbonatitos	Sustenta a relação entre anomalias de Ca, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Co, Th e Ce e o contexto carbonatítico de Caçapava do Sul.
Garcia (2023)	Trabalho regional	Prospecção ao sul do Granito Caçapava	Apoia a relação entre ETR, Nb, P, mineralogia acessória e óxidos maiores associados.
Vieira *et al*. (2025)	Trabalho regional	Integração entre geologia, geoquímica, geofísica e mineralogia	Aproxima diretamente o tema regional do PTRP, com destaque para apatita, monazita, pirocloro e potencial exploratório para ETR.
Rose, Hawkes e Webb (1979)	Livro clássico	Geoquímica aplicada à exploração mineral	Sustenta o uso da geoquímica de solos, regolitos e materiais superficiais em campanhas de prospecção mineral.
Reimann, Filzmoser e Garrett (2005)	Artigo científico	Tratamento estatístico de dados geoquímicos	Apoia a interpretação de distribuições, valores anômalos, variabilidade natural e cuidado com dados geoquímicos.
Myers (1997)	Livro	Erro, incerteza e representatividade amostral	Sustenta a discussão sobre risco, amostragem, representatividade, variabilidade e possíveis fontes de incerteza no fluxo de geração dos dados.
Sinclair e Blackwell (2002)	Livro	Qualidade do banco de dados e dados pareados	Fundamenta a comparação entre amostras originais e duplicatas, incluindo avaliação gráfica, estatística, viés, dispersão e comportamento dos pares.
Abzalov (2016)	Livro	QA/QC, duplicatas, precisão e erros de amostragem	Base principal para interpretação das duplicatas de campo e laboratoriais, controle de precisão, dados pareados e avaliação de reprodutibilidade.
Geboy e Engle (2011)	Relatório técnico	QA/QC em dados geoquímicos	Apoia o uso de duplicatas, padrões, brancos, materiais de referência, controles laboratoriais e tratamento de dados geoquímicos.
CIM (2018)	Diretriz técnica	Boas práticas em exploração mineral	Reforça a importância de documentação, rastreabilidade, cadeia de custódia, controle analítico e verificação de dados.
Stanley e Lawie (2007)	Artigo técnico	Diferença relativa em determinações geoquímicas	Apoia a utilização de medidas relativas, como RPD, na avaliação de pares analíticos.
Smee *et al*. (2024)	Trabalho técnico/artigo aplicado	QA/QC, duplicatas, precisão e gráficos	Apoia o uso de diagramas de dispersão, reta X=Y, faixas auxiliares, diferença relativa, identificação de pares discrepantes e avaliação de precisão.

APÊNDICE B - Detalhamento dos fatores de conversão elemento–óxido

Elemento	Óxido calculado	nº átomos do elemento	nº átomos de O	Massa atômica elemento	Massa atômica O	Massa molar do óxido	Fator de conversão	Fórmula do fator	Fonte
La	La2O3	2,0000	3,0000	138,9055	15,9990	325,8079	1,1728	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Ce	CeO2	1,0000	2,0000	140,1160	15,9990	172,1140	1,2284	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Pr	Pr6O11	6,0000	11,0000	140,9077	15,9990	1021,4350	1,2082	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Nd	Nd2O3	2,0000	3,0000	144,2420	15,9990	336,4810	1,1664	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Sm	Sm2O3	2,0000	3,0000	150,3600	15,9990	348,7170	1,1596	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Eu	Eu2O3	2,0000	3,0000	151,9640	15,9990	351,9250	1,1579	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Gd	Gd2O3	2,0000	3,0000	157,2500	15,9990	362,4970	1,1526	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Tb	Tb4O7	4,0000	7,0000	158,9254	15,9990	747,6944	1,1762	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Dy	Dy2O3	2,0000	3,0000	162,5000	15,9990	372,9970	1,1477	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Ho	Ho2O3	2,0000	3,0000	164,9303	15,9990	377,8577	1,1455	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Er	Er2O3	2,0000	3,0000	167,2590	15,9990	382,5150	1,1435	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Tm	Tm2O3	2,0000	3,0000	168,9342	15,9990	385,8654	1,1421	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Yb	Yb2O3	2,0000	3,0000	173,0450	15,9990	394,0870	1,1387	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Lu	Lu2O3	2,0000	3,0000	174,9668	15,9990	397,9306	1,1372	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW
Y	Y2O3	2,0000	3,0000	88,9058	15,9990	225,8087	1,2699	Massa molar do óxido / massa do elemento no óxido	JCU; IUPAC/CIAAW

APÊNDICE C – Base geoquímica original recebida da SGS

Empresa QA/QC	Sample	Type	Code QAQC	Furo	Intervalo	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Y (ppm)	TiO2 (%)	P2O5 (%)
RAD	PTR000020	SMP	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	228,50	509,80	57,33	211,00	38,10	10,46	27,10	3,05	16,88	2,52	6,57	0,71	4,20	0,52	61,11	6,42	2,15
RAD	PTR000020	DUP	PTR000021	AUGTR_0004	0–1 m	247,70	560,40	59,49	215,70	39,90	10,61	26,82	3,02	17,49	2,48	6,35	0,69	4,20	0,51	61,25	6,33	1,94
RAD	PTR000040	SMP	PTR000041	AUGTR_0007	4–5 m	102,40	179,20	20,84	72,40	14,10	3,66	10,16	1,18	7,05	1,11	3,18	0,33	2,30	0,27	28,97	2,34	0,88
RAD	PTR000040	DUP	PTR000042	AUGTR_0007	4–5 m	44,80	82,20	9,84	36,30	7,60	1,98	5,99	0,62	3,75	0,63	1,73	0,19	1,30	0,16	16,06	1,23	0,48
RAD	PTR000060	SMP	PTR000062	AUGTR_0011	2–3 m	449,20	734,10	64,92	239,00	38,60	10,28	27,57	3,34	19,00	3,06	7,94	0,97	5,80	0,72	87,95	4,41	2,31
RAD	PTR000060	DUP	PTR000063	AUGTR_0011	2–3 m	576,10	893,40	76,86	271,70	42,20	10,91	31,28	3,69	22,38	3,67	9,96	1,18	7,70	0,93	114,08	3,98	2,57
RAD	PTR000080	SMP	PTR000083	AUGTR_0013	11–12 m	93,80	194,10	23,81	86,60	17,40	4,91	12,60	1,44	8,20	1,21	3,16	0,34	2,10	0,27	30,68	4,65	1,14
RAD	PTR000080	DUP	PTR000084	AUGTR_0013	11–12 m	107,10	236,20	24,63	87,40	17,00	4,84	12,15	1,42	8,54	1,40	3,64	0,41	2,90	0,33	33,41	4,62	0,56
RAD	PTR000100	SMP	PTR000104	AUGTR_0016	2–3 m	163,90	302,20	33,63	119,60	20,80	6,14	15,73	1,89	11,59	1,86	5,45	0,73	4,80	0,57	53,97	4,05	2,30
RAD	PTR000100	DUP	PTR000105	AUGTR_0016	2–3 m	263,40	605,30	64,46	236,40	40,00	10,39	28,63	2,99	16,74	2,61	6,44	0,71	4,30	0,56	65,16	3,19	4,11
RAD	PTR000120	SMP	PTR000125	AUGTR_0018	5–6 m	261,00	646,00	70,12	254,50	40,80	10,44	24,14	2,26	11,28	1,49	3,29	0,34	1,90	0,22	33,11	8,30	0,89
RAD	PTR000120	DUP	PTR000126	AUGTR_0018	5–6 m	245,50	573,40	61,27	220,20	36,70	9,15	22,21	2,10	10,98	1,51	3,85	0,41	2,30	0,26	35,79	7,35	1,51
RAD	PTR000140	SMP	PTR000146	AUGTR_0021	1–2 m	225,80	439,10	49,45	177,60	29,70	8,45	20,11	2,28	11,11	1,69	3,65	0,35	2,10	0,28	38,27	7,35	2,58
RAD	PTR000140	DUP	PTR000207	AUGTR_0021	1–2 m	244,60	452,90	50,64	180,30	30,20	8,27	21,55	2,42	11,64	1,63	3,37	0,38	1,80	0,31	37,24	7,77	2,63
RAD	PTR000160	SMP	PTR000166	AUGTR_0023	2–3 m	177,50	256,00	26,16	89,30	16,80	5,08	14,15	1,86	10,11	1,59	3,74	0,43	2,20	0,30	40,15	5,26	2,77
RAD	PTR000160	DUP	PTR000208	AUGTR_0023	2–3 m	165,10	233,90	24,04	82,70	16,00	4,99	13,78	1,80	9,87	1,53	3,68	0,43	2,20	0,30	39,93	4,93	2,75
RAD	PTR000180	SMP	PTR000186	AUGTR_0025	12–12,7 m	81,40	156,60	17,25	63,10	11,40	3,17	8,48	1,03	5,13	0,83	2,22	0,25	1,30	0,19	20,33	3,50	0,64
RAD	PTR000180	DUP	PTR000209	AUGTR_0025	12–12,7 m	78,60	148,90	16,72	62,00	11,10	3,00	8,49	0,97	5,19	0,80	1,75	0,18	1,30	0,18	18,25	3,52	0,63
RAD	PTR000200	SMP	PTR000206	AUGTR_0027	13–13,5 m	168,90	289,90	29,50	102,70	16,80	4,76	12,93	1,59	8,73	1,53	3,92	0,52	3,00	0,41	40,31	3,56	1,17
RAD	PTR000200	DUP	PTR000210	AUGTR_0027	13–13,5 m	177,10	306,50	30,88	105,60	17,60	4,79	13,21	1,65	9,11	1,52	3,92	0,50	3,00	0,45	39,67	3,65	1,25
RAD	PTR000220	SMP	PTR000230	AUGTR_0030	1–2 m	229,00	431,20	41,40	161,20	25,20	7,45	17,38	1,91	10,00	1,40	3,03	0,37	1,80	0,23	35,02	6,16	1,31
RAD	PTR000220	DUP	PTR000314	AUGTR_0030	1–2 m	196,30	374,50	39,03	139,40	23,30	6,21	16,70	1,98	9,53	1,53	3,56	0,41	2,30	0,30	36,47	5,53	1,58
RAD	PTR000240	SMP	PTR000250	AUGTR_0032	6–7 m	60,90	118,80	8,94	47,10	8,10	2,74	7,41	0,89	5,10	0,82	2,27	0,28	1,70	0,20	24,16	2,63	0,86
RAD	PTR000240	DUP	PTR000315	AUGTR_0032	6–7 m	86,40	169,40	19,75	76,50	13,50	3,84	10,86	1,34	7,09	1,15	3,00	0,34	2,00	0,29	29,07	4,57	1,37
RAD	PTR000260	SMP	PTR000270	AUGTR_0034	8–9 m	299,40	693,40	78,48	298,40	44,20	10,67	27,11	2,78	12,37	1,68	3,76	0,39	2,10	0,24	38,81	8,05	1,04
RAD	PTR000260	DUP	PTR000316	AUGTR_0034	8–9 m	322,10	599,70	60,71	216,10	32,20	8,21	20,55	2,30	10,70	1,64	3,54	0,42	2,40	0,27	37,35	5,48	1,93
RAD	PTR000280	SMP	PTR000290	AUGTR_0041	1–2 m	387,30	951,30	120,69	463,10	62,60	14,19	33,53	3,38	13,46	1,79	3,38	0,34	1,60	0,19	35,40	9,60	0,31
RAD	PTR000280	DUP	PTR000317	AUGTR_0041	1–2 m	486,00	1189,60	146,82	566,00	78,00	17,48	41,51	3,96	16,11	2,05	3,92	0,36	1,90	0,20	39,80	11,23	0,32
RAD	PTR000300	SMP	PTR000310	AUGTR_0043	5–6 m	402,70	821,90	87,55	314,90	46,30	11,44	30,08	3,66	18,21	2,66	6,23	0,69	3,80	0,49	67,13	5,09	1,01
RAD	PTR000300	DUP	PTR000318	AUGTR_0043	5–6 m	537,20	1097,60	115,84	413,10	56,10	13,27	34,52	3,90	18,70	2,86	6,55	0,72	3,90	0,50	71,62	4,49	1,12
SGS	PTR000019	SMP	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	171,40	436,60	49,72	188,90	32,90	8,51	21,35	2,22	12,14	1,73	4,70	0,48	3,00	0,40	43,45	5,42	2,63
SGS	PTR000019	DUP	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	165,50	413,90	47,13	175,60	31,20	7,99	19,77	2,15	11,24	1,77	4,46	0,47	3,00	0,35	41,67	5,11	2,73
SGS	PTR000038	SMP	PTR000039	AUGTR_0007	2–3 m	283,60	629,20	68,23	247,20	48,60	13,27	35,45	3,67	19,30	2,65	6,25	0,64	3,80	0,41	63,90	6,57	2,66
SGS	PTR000038	DUP	PTR000039	AUGTR_0007	2–3 m	294,50	649,20	70,58	261,80	50,30	14,04	36,38	3,81	20,34	2,82	6,90	0,66	3,80	0,43	66,45	6,81	2,65
SGS	PTR000066	SMP	PTR000069	AUGTR_0012	2–3 m	126,80	249,60	26,17	102,00	17,10	4,63	12,77	1,51	8,52	1,35	3,47	0,39	2,30	0,27	34,65	4,82	1,43
SGS	PTR000066	DUP	PTR000069	AUGTR_0012	2–3 m	130,70	256,30	26,97	106,30	18,00	4,74	13,13	1,61	8,72	1,39	3,58	0,43	2,40	0,32	36,75	4,87	1,45
SGS	PTR000085	SMP	PTR000089	AUGTR_0014	3–4 m	117,50	236,00	28,44	95,70	18,30	5,09	13,25	1,60	8,77	1,43	3,83	0,53	2,80	0,43	34,21	4,40	1,21
SGS	PTR000085	DUP	PTR000089	AUGTR_0014	3–4 m	115,00	228,20	27,10	95,60	17,70	5,00	12,95	1,48	8,71	1,36	3,67	0,42	2,60	0,31	32,89	4,44	1,23
SGS	PTR000114	SMP	PTR000119	AUGTR_0017	8–8,8 m	241,20	405,60	42,90	147,00	24,80	7,10	18,77	2,08	12,35	1,95	5,08	0,60	3,50	0,46	52,18	4,14	2,55
SGS	PTR000114	DUP	PTR000119	AUGTR_0017	8–8,8 m	248,40	417,50	44,43	152,30	25,90	7,26	19,55	2,22	12,99	2,03	4,92	0,62	3,70	0,48	52,63	4,17	2,68
SGS	PTR000133	SMP	PTR000139	AUGTR_0020	1–2 m	198,00	373,80	42,73	152,20	26,80	7,44	18,31	2,01	10,97	1,60	3,91	0,43	2,40	0,30	38,91	6,17	1,05
SGS	PTR000133	DUP	PTR000139	AUGTR_0020	1–2 m	188,50	356,60	41,01	144,10	25,20	7,20	17,66	1,94	10,70	1,52	3,75	0,42	2,40	0,26	37,36	6,15	1,07
SGS	PTR000157	SMP	PTR000163	AUGTR_0022	8–8,5 m	146,00	225,90	22,84	81,30	16,00	5,56	15,05	1,96	10,86	1,83	4,28	0,43	2,60	0,30	43,07	5,66	0,96
SGS	PTR000157	DUP	PTR000163	AUGTR_0022	8–8,5 m	146,40	225,80	22,72	79,50	17,00	5,56	14,38	1,98	10,82	1,72	4,52	0,47	2,60	0,36	42,49	5,71	1,00
SGS	PTR000177	SMP	PTR000183	AUGTR_0025	9–10 m	263,80	496,90	53,53	193,40	30,70	8,45	21,16	2,50	11,92	1,80	3,73	0,39	2,10	0,27	40,45	6,98	1,71
SGS	PTR000177	DUP	PTR000183	AUGTR_0025	9–10 m	280,30	513,80	56,99	203,00	33,60	8,87	22,64	2,53	12,45	1,84	4,31	0,45	2,30	0,29	42,02	7,18	1,71
SGS	PTR000196	SMP	PTR000202	AUGTR_0027	9–10 m	159,50	265,30	27,46	99,30	17,60	5,00	13,69	1,78	9,70	1,59	3,83	0,44	2,60	0,36	40,89	4,58	2,16
SGS	PTR000196	DUP	PTR000202	AUGTR_0027	9–10 m	159,60	270,70	28,32	100,80	17,30	5,36	14,13	1,84	9,20	1,51	4,11	0,47	2,80	0,40	41,39	4,53	2,24
SGS	PTR000219	SMP	PTR000229	AUGTR_0030	0–1 m	218,00	393,00	35,78	141,20	21,90	6,67	16,07	1,85	9,04	1,41	3,14	0,33	2,00	0,24	34,81	5,75	1,73
SGS	PTR000219	DUP	PTR000229	AUGTR_0030	0–1 m	209,60	376,80	34,60	134,00	21,60	6,35	16,11	1,87	9,35	1,38	3,16	0,36	1,90	0,24	34,48	5,59	1,62
SGS	PTR000239	SMP	PTR000249	AUGTR_0032	5–6 m	73,20	144,30	10,59	55,40	10,40	3,51	10,06	1,18	6,77	1,17	2,85	0,34	2,20	0,24	29,49	4,48	1,26
SGS	PTR000239	DUP	PTR000249	AUGTR_0032	5–6 m	78,50	155,60	12,27	61,20	11,40	3,49	9,87	1,15	6,55	1,06	3,09	0,29	2,30	0,30	30,97	4,50	1,26
SGS	PTR000273	SMP	PTR000283	AUGTR_0038	1–2 m	229,20	584,50	65,11	252,90	39,60	9,72	24,59	2,76	12,54	1,80	4,02	0,43	2,50	0,32	41,46	8,09	0,59
SGS	PTR000273	DUP	PTR000283	AUGTR_0038	1–2 m	226,40	573,00	64,22	249,40	39,50	9,57	24,65	2,78	12,32	1,79	3,78	0,45	2,40	0,31	40,14	7,93	0,52
SGS	PTR000293	SMP	PTR000303	AUGTR_0042	7–8 m	127,90	298,20	34,65	135,10	21,20	5,80	16,19	1,91	9,69	1,48	3,69	0,43	2,50	0,35	38,18	5,18	2,27
SGS	PTR000293	DUP	PTR000303	AUGTR_0042	7–8 m	126,30	297,10	34,78	131,10	22,20	5,49	16,16	1,87	9,26	1,52	3,51	0,43	2,50	0,30	38,36	5,12	2,48

APÊNDICE D – Base geoquímica tratada com conversão para óxidos, MREO e TREO+Y

Empresa QA/QC	Sample	Type	Code QAQC	Furo	Intervalo	La2O3 (ppm)	CeO2 (ppm)	Pr6O11 (ppm)	Nd2O3 (ppm)	Sm2O3 (ppm)	Eu2O3 (ppm)	Gd2O3 (ppm)	Tb4O7 (ppm)	Dy2O3 (ppm)	Ho2O3 (ppm)	Er2O3 (ppm)	Tm2O3 (ppm)	Yb2O3 (ppm)	Lu2O3 (ppm)	Y2O3 (ppm)	MREO (ppm óxidos)	TREO+Y (ppm óxidos)
RAD	PTR000020	SMP	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	267,98	626,24	69,27	246,11	44,18	12,11	31,24	3,59	19,37	2,89	7,51	0,81	4,78	0,59	77,60	338,34	1414,28
RAD	PTR000020	DUP	PTR000021	AUGTR_0004	0–1 m	290,50	688,40	71,88	251,59	46,27	12,29	30,91	3,55	20,07	2,84	7,26	0,79	4,78	0,58	77,78	347,09	1509,49
RAD	PTR000040	SMP	PTR000041	AUGTR_0007	4–5 m	120,09	220,13	25,18	84,45	16,35	4,24	11,71	1,39	8,09	1,27	3,64	0,38	2,62	0,31	36,79	119,11	536,63
RAD	PTR000040	DUP	PTR000042	AUGTR_0007	4–5 m	52,54	100,97	11,89	42,34	8,81	2,29	6,90	0,73	4,30	0,72	1,98	0,22	1,48	0,18	20,39	59,26	255,76
RAD	PTR000060	SMP	PTR000062	AUGTR_0011	2–3 m	526,82	901,77	78,44	278,77	44,76	11,90	31,78	3,93	21,81	3,51	9,08	1,11	6,60	0,82	111,69	382,94	2032,78
RAD	PTR000060	DUP	PTR000063	AUGTR_0011	2–3 m	675,65	1097,45	92,86	316,91	48,94	12,63	36,05	4,34	25,69	4,20	11,39	1,35	8,77	1,06	144,87	439,80	2482,16
RAD	PTR000080	SMP	PTR000083	AUGTR_0013	11–12 m	110,01	238,43	28,77	101,01	20,18	5,69	14,52	1,69	9,41	1,39	3,61	0,39	2,39	0,31	38,96	140,88	576,76
RAD	PTR000080	DUP	PTR000084	AUGTR_0013	11–12 m	125,61	290,15	29,76	101,94	19,71	5,60	14,00	1,67	9,80	1,60	4,16	0,47	3,30	0,38	42,43	143,17	650,59
RAD	PTR000100	SMP	PTR000104	AUGTR_0016	2–3 m	192,22	371,22	40,63	139,50	24,12	7,11	18,13	2,22	13,30	2,13	6,23	0,83	5,47	0,65	68,54	195,66	892,31
RAD	PTR000100	DUP	PTR000105	AUGTR_0016	2–3 m	308,92	743,55	77,88	275,74	46,38	12,03	33,00	3,52	19,21	2,99	7,36	0,81	4,90	0,64	82,75	376,35	1619,67
RAD	PTR000120	SMP	PTR000125	AUGTR_0018	5–6 m	306,10	793,55	84,72	296,85	47,31	12,09	27,82	2,66	12,95	1,71	3,76	0,39	2,16	0,25	42,05	397,17	1634,36
RAD	PTR000120	DUP	PTR000126	AUGTR_0018	5–6 m	287,92	704,36	74,03	256,84	42,56	10,59	25,60	2,47	12,60	1,73	4,40	0,47	2,62	0,30	45,45	345,94	1471,94
RAD	PTR000140	SMP	PTR000146	AUGTR_0021	1–2 m	264,82	539,39	59,75	207,15	34,44	9,78	23,18	2,68	12,75	1,94	4,17	0,40	2,39	0,32	48,60	282,33	1211,76
RAD	PTR000140	DUP	PTR000207	AUGTR_0021	1–2 m	286,87	556,34	61,18	210,30	35,02	9,58	24,84	2,85	13,36	1,87	3,85	0,43	2,05	0,35	47,29	287,69	1256,18
RAD	PTR000160	SMP	PTR000166	AUGTR_0023	2–3 m	208,17	314,47	31,61	104,16	19,48	5,88	16,31	2,19	11,60	1,82	4,28	0,49	2,51	0,34	50,99	149,56	774,29
RAD	PTR000160	DUP	PTR000208	AUGTR_0023	2–3 m	193,63	287,32	29,05	96,46	18,55	5,78	15,88	2,12	11,33	1,75	4,21	0,49	2,51	0,34	50,71	138,95	720,12
RAD	PTR000180	SMP	PTR000186	AUGTR_0025	12–12,7 m	95,47	192,37	20,84	73,60	13,22	3,67	9,77	1,21	5,89	0,95	2,54	0,29	1,48	0,22	25,82	101,54	447,33
RAD	PTR000180	DUP	PTR000209	AUGTR_0025	12–12,7 m	92,18	182,91	20,20	72,32	12,87	3,47	9,79	1,14	5,96	0,92	2,00	0,21	1,48	0,20	23,18	99,62	428,82
RAD	PTR000200	SMP	PTR000206	AUGTR_0027	13–13,5 m	198,09	356,11	35,64	119,79	19,48	5,51	14,90	1,87	10,02	1,75	4,48	0,59	3,42	0,47	51,19	167,32	823,32
RAD	PTR000200	DUP	PTR000210	AUGTR_0027	13–13,5 m	207,70	376,50	37,31	123,17	20,41	5,55	15,23	1,94	10,46	1,74	4,48	0,57	3,42	0,51	50,38	172,88	859,37
RAD	PTR000220	SMP	PTR000230	AUGTR_0030	1–2 m	268,57	529,69	50,02	188,02	29,22	8,63	20,03	2,25	11,48	1,60	3,46	0,42	2,05	0,26	44,47	251,77	1160,18
RAD	PTR000220	DUP	PTR000314	AUGTR_0030	1–2 m	230,22	460,04	47,16	162,60	27,02	7,19	19,25	2,33	10,94	1,75	4,07	0,47	2,62	0,34	46,31	223,02	1022,30
RAD	PTR000240	SMP	PTR000250	AUGTR_0032	6–7 m	71,42	145,93	10,80	54,94	9,39	3,17	8,54	1,05	5,85	0,94	2,60	0,32	1,94	0,23	30,68	72,64	347,80
RAD	PTR000240	DUP	PTR000315	AUGTR_0032	6–7 m	101,33	208,09	23,86	89,23	15,65	4,45	12,52	1,58	8,14	1,32	3,43	0,39	2,28	0,33	36,92	122,80	509,50
RAD	PTR000260	SMP	PTR000270	AUGTR_0034	8–9 m	351,14	851,77	94,82	348,05	51,25	12,35	31,25	3,27	14,20	1,92	4,30	0,45	2,39	0,27	49,28	460,34	1816,72
RAD	PTR000260	DUP	PTR000316	AUGTR_0034	8–9 m	377,76	736,67	73,35	252,06	37,34	9,51	23,69	2,71	12,28	1,88	4,05	0,48	2,73	0,31	47,43	340,39	1582,23
RAD	PTR000280	SMP	PTR000290	AUGTR_0041	1–2 m	454,23	1168,58	145,82	540,16	72,59	16,43	38,65	3,98	15,45	2,05	3,87	0,39	1,82	0,22	44,95	705,40	2509,17
RAD	PTR000280	DUP	PTR000317	AUGTR_0041	1–2 m	569,98	1461,30	177,39	660,18	90,45	20,24	47,84	4,66	18,49	2,35	4,48	0,41	2,16	0,23	50,54	860,72	3110,71
RAD	PTR000300	SMP	PTR000310	AUGTR_0043	5–6 m	472,29	1009,62	105,78	367,30	53,69	13,25	34,67	4,30	20,90	3,05	7,12	0,79	4,33	0,56	85,25	498,28	2182,89
RAD	PTR000300	DUP	PTR000318	AUGTR_0043	5–6 m	630,03	1348,29	139,96	481,84	65,05	15,37	39,79	4,59	21,46	3,28	7,49	0,82	4,44	0,57	90,95	647,85	2853,92
SGS	PTR000019	SMP	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	201,02	536,32	60,07	220,33	38,15	9,85	24,61	2,61	13,93	1,98	5,37	0,55	3,42	0,45	55,18	296,95	1173,85
SGS	PTR000019	DUP	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	194,10	508,43	56,94	204,82	36,18	9,25	22,79	2,53	12,90	2,03	5,10	0,54	3,42	0,40	52,92	277,19	1112,34
SGS	PTR000038	SMP	PTR000039	AUGTR_0007	2–3 m	332,61	772,91	82,44	288,33	56,36	15,37	40,86	4,32	22,15	3,04	7,15	0,73	4,33	0,47	81,15	397,24	1712,19
SGS	PTR000038	DUP	PTR000039	AUGTR_0007	2–3 m	345,39	797,48	85,27	305,36	58,33	16,26	41,93	4,48	23,34	3,23	7,89	0,75	4,33	0,49	84,38	418,46	1778,92
SGS	PTR000066	SMP	PTR000069	AUGTR_0012	2–3 m	148,71	306,61	31,62	118,97	19,83	5,36	14,72	1,78	9,78	1,55	3,97	0,45	2,62	0,31	44,00	162,15	710,26
SGS	PTR000066	DUP	PTR000069	AUGTR_0012	2–3 m	153,28	314,84	32,59	123,99	20,87	5,49	15,13	1,89	10,01	1,59	4,09	0,49	2,73	0,36	46,67	168,48	734,04
SGS	PTR000085	SMP	PTR000089	AUGTR_0014	3–4 m	137,80	289,90	34,36	111,62	21,22	5,89	15,27	1,88	10,07	1,64	4,38	0,61	3,19	0,49	43,44	157,93	681,77
SGS	PTR000085	DUP	PTR000089	AUGTR_0014	3–4 m	134,87	280,32	32,74	111,51	20,52	5,79	14,93	1,74	10,00	1,56	4,20	0,48	2,96	0,35	41,77	155,99	663,74
SGS	PTR000114	SMP	PTR000119	AUGTR_0017	8–8,8 m	282,88	498,24	51,83	171,46	28,76	8,22	21,63	2,45	14,17	2,23	5,81	0,69	3,99	0,52	66,26	239,91	1159,14
SGS	PTR000114	DUP	PTR000119	AUGTR_0017	8–8,8 m	291,32	512,86	53,68	177,64	30,03	8,41	22,53	2,61	14,91	2,33	5,63	0,71	4,21	0,55	66,83	248,84	1194,25
SGS	PTR000133	SMP	PTR000139	AUGTR_0020	1–2 m	232,21	459,18	51,63	177,53	31,08	8,61	21,10	2,36	12,59	1,83	4,47	0,49	2,73	0,34	49,41	244,11	1055,57
SGS	PTR000133	DUP	PTR000139	AUGTR_0020	1–2 m	221,07	438,05	49,55	168,08	29,22	8,34	20,35	2,28	12,28	1,74	4,29	0,48	2,73	0,30	47,44	232,19	1006,20
SGS	PTR000157	SMP	PTR000163	AUGTR_0022	8–8,5 m	171,23	277,50	27,60	94,83	18,55	6,44	17,35	2,31	12,46	2,10	4,89	0,49	2,96	0,34	54,69	137,19	693,73
SGS	PTR000157	DUP	PTR000163	AUGTR_0022	8–8,5 m	171,70	277,37	27,45	92,73	19,71	6,44	16,57	2,33	12,42	1,97	5,17	0,54	2,96	0,41	53,96	134,93	691,73
SGS	PTR000177	SMP	PTR000183	AUGTR_0025	9–10 m	309,38	610,39	64,67	225,58	35,60	9,78	24,39	2,94	13,68	2,06	4,27	0,45	2,39	0,31	51,37	306,88	1357,27
SGS	PTR000177	DUP	PTR000183	AUGTR_0025	9–10 m	328,74	631,15	68,86	236,78	38,96	10,27	26,09	2,98	14,29	2,11	4,93	0,51	2,62	0,33	53,36	322,90	1421,98
SGS	PTR000196	SMP	PTR000202	AUGTR_0027	9–10 m	187,06	325,89	33,18	115,82	20,41	5,79	15,78	2,09	11,13	1,82	4,38	0,50	2,96	0,41	51,93	162,23	779,16
SGS	PTR000196	DUP	PTR000202	AUGTR_0027	9–10 m	187,18	332,53	34,22	117,57	20,06	6,21	16,29	2,16	10,56	1,73	4,70	0,54	3,19	0,45	52,56	164,51	789,94
SGS	PTR000219	SMP	PTR000229	AUGTR_0030	0–1 m	255,67	482,76	43,23	164,70	25,40	7,72	18,52	2,18	10,38	1,62	3,59	0,38	2,28	0,27	44,21	220,48	1062,89
SGS	PTR000219	DUP	PTR000229	AUGTR_0030	0–1 m	245,82	462,86	41,80	156,30	25,05	7,35	18,57	2,20	10,73	1,58	3,61	0,41	2,16	0,27	43,79	211,03	1022,51
SGS	PTR000239	SMP	PTR000249	AUGTR_0032	5–6 m	85,85	177,26	12,79	64,62	12,06	4,06	11,60	1,39	7,77	1,34	3,26	0,39	2,51	0,27	37,45	86,57	422,61
SGS	PTR000239	DUP	PTR000249	AUGTR_0032	5–6 m	92,06	191,14	14,82	71,38	13,22	4,04	11,38	1,35	7,52	1,21	3,53	0,33	2,62	0,34	39,33	95,08	454,29
SGS	PTR000273	SMP	PTR000283	AUGTR_0038	1–2 m	268,81	718,00	78,67	294,98	45,92	11,25	28,34	3,25	14,39	2,06	4,60	0,49	2,85	0,36	52,65	391,29	1526,62
SGS	PTR000273	DUP	PTR000283	AUGTR_0038	1–2 m	265,52	703,87	77,59	290,90	45,80	11,08	28,41	3,27	14,14	2,05	4,32	0,51	2,73	0,35	50,97	385,90	1501,54
SGS	PTR000293	SMP	PTR000303	AUGTR_0042	7–8 m	150,00	366,31	41,86	157,58	24,58	6,72	18,66	2,25	11,12	1,70	4,22	0,49	2,85	0,40	48,48	212,81	837,22
SGS	PTR000293	DUP	PTR000303	AUGTR_0042	7–8 m	148,12	364,96	42,02	152,92	25,74	6,36	18,63	2,20	10,63	1,74	4,01	0,49	2,85	0,34	48,71	207,76	829,72

APÊNDICE E - Pares original–duplicata utilizados na análise de QA/QC

Empresa QA/QC	Tipo de duplicata	Sample par	Furo	Intervalo	Código original	Código duplicata	Analito	Unidade	Valor original	Valor duplicata
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	TREO+Y	ppm óxidos	1414,28	1509,49
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	MREO	ppm óxidos	338,34	347,09
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	69,27	71,88
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	Nd_2O_3	ppm óxidos	246,11	251,59
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	Dy_2O_3	ppm óxidos	19,37	20,07
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	Tb_4O_7	ppm óxidos	3,59	3,55
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	TiO_2	%	6,42	6,33
RAD	Duplicata de campo	PTR000020	AUGTR_0004	0–1 m	PTR000020	PTR000021	P_2O_5	%	2,15	1,94
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	TREO+Y	ppm óxidos	536,63	255,76
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	MREO	ppm óxidos	119,11	59,26
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	25,18	11,89
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	Nd_2O_3	ppm óxidos	84,45	42,34
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	Dy_2O_3	ppm óxidos	8,09	4,30
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,39	0,73
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	TiO_2	%	2,34	1,23
RAD	Duplicata de campo	PTR000040	AUGTR_0007	4–5 m	PTR000041	PTR000042	P_2O_5	%	0,88	0,48
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	TREO+Y	ppm óxidos	2032,78	2482,16
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	MREO	ppm óxidos	382,94	439,80
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	78,44	92,86
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	Nd_2O_3	ppm óxidos	278,77	316,91
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	Dy_2O_3	ppm óxidos	21,81	25,69
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	Tb_4O_7	ppm óxidos	3,93	4,34
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	TiO_2	%	4,41	3,98
RAD	Duplicata de campo	PTR000060	AUGTR_0011	2–3 m	PTR000062	PTR000063	P_2O_5	%	2,31	2,57
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	TREO+Y	ppm óxidos	576,76	650,59
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	MREO	ppm óxidos	140,88	143,17
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	28,77	29,76
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	Nd_2O_3	ppm óxidos	101,01	101,94
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	Dy_2O_3	ppm óxidos	9,41	9,80
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,69	1,67
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	TiO_2	%	4,65	4,62
RAD	Duplicata de campo	PTR000080	AUGTR_0013	11–12 m	PTR000083	PTR000084	P_2O_5	%	1,14	0,56
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	TREO+Y	ppm óxidos	892,31	1619,67
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	MREO	ppm óxidos	195,66	376,35
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	40,63	77,88
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	Nd_2O_3	ppm óxidos	139,50	275,74
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	Dy_2O_3	ppm óxidos	13,30	19,21
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,22	3,52
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	TiO_2	%	4,05	3,19
RAD	Duplicata de campo	PTR000100	AUGTR_0016	2–3 m	PTR000104	PTR000105	P_2O_5	%	2,30	4,11
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	TREO+Y	ppm óxidos	1634,36	1471,94
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	MREO	ppm óxidos	397,17	345,94
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	84,72	74,03
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	Nd_2O_3	ppm óxidos	296,85	256,84
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	Dy_2O_3	ppm óxidos	12,95	12,60
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,66	2,47
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	TiO_2	%	8,30	7,35
RAD	Duplicata de campo	PTR000120	AUGTR_0018	5–6 m	PTR000125	PTR000126	P_2O_5	%	0,89	1,51
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	TREO+Y	ppm óxidos	1211,76	1256,18
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	MREO	ppm óxidos	282,33	287,69
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	59,75	61,18
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	Nd_2O_3	ppm óxidos	207,15	210,30
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	Dy_2O_3	ppm óxidos	12,75	13,36
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,68	2,85
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	TiO_2	%	7,35	7,77
RAD	Duplicata de campo	PTR000140	AUGTR_0021	1–2 m	PTR000146	PTR000207	P_2O_5	%	2,58	2,63
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	TREO+Y	ppm óxidos	774,29	720,12
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	MREO	ppm óxidos	149,56	138,95
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	31,61	29,05
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	Nd_2O_3	ppm óxidos	104,16	96,46
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	Dy_2O_3	ppm óxidos	11,60	11,33
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,19	2,12
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	TiO_2	%	5,26	4,93
RAD	Duplicata de campo	PTR000160	AUGTR_0023	2–3 m	PTR000166	PTR000208	P_2O_5	%	2,77	2,75
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	TREO+Y	ppm óxidos	447,33	428,82
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	MREO	ppm óxidos	101,54	99,62
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	20,84	20,20
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	Nd_2O_3	ppm óxidos	73,60	72,32
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	Dy_2O_3	ppm óxidos	5,89	5,96
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,21	1,14
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	TiO_2	%	3,50	3,52
RAD	Duplicata de campo	PTR000180	AUGTR_0025	12–12,7 m	PTR000186	PTR000209	P_2O_5	%	0,64	0,63
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	TREO+Y	ppm óxidos	823,32	859,37
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	MREO	ppm óxidos	167,32	172,88
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	35,64	37,31
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	Nd_2O_3	ppm óxidos	119,79	123,17
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	Dy_2O_3	ppm óxidos	10,02	10,46
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,87	1,94
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	TiO_2	%	3,56	3,65
RAD	Duplicata de campo	PTR000200	AUGTR_0027	13–13,5 m	PTR000206	PTR000210	P_2O_5	%	1,17	1,25
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	TREO+Y	ppm óxidos	1160,18	1022,30
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	MREO	ppm óxidos	251,77	223,02
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	50,02	47,16
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	Nd_2O_3	ppm óxidos	188,02	162,60
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	Dy_2O_3	ppm óxidos	11,48	10,94
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,25	2,33
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	TiO_2	%	6,16	5,53
RAD	Duplicata de campo	PTR000220	AUGTR_0030	1–2 m	PTR000230	PTR000314	P_2O_5	%	1,31	1,58
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	TREO+Y	ppm óxidos	347,80	509,50
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	MREO	ppm óxidos	72,64	122,80
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	10,80	23,86
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	Nd_2O_3	ppm óxidos	54,94	89,23
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	Dy_2O_3	ppm óxidos	5,85	8,14
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,05	1,58
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	TiO_2	%	2,63	4,57
RAD	Duplicata de campo	PTR000240	AUGTR_0032	6–7 m	PTR000250	PTR000315	P_2O_5	%	0,86	1,37
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	TREO+Y	ppm óxidos	1816,72	1582,23
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	MREO	ppm óxidos	460,34	340,39
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	94,82	73,35
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	Nd_2O_3	ppm óxidos	348,05	252,06
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	Dy_2O_3	ppm óxidos	14,20	12,28
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	Tb_4O_7	ppm óxidos	3,27	2,71
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	TiO_2	%	8,05	5,48
RAD	Duplicata de campo	PTR000260	AUGTR_0034	8–9 m	PTR000270	PTR000316	P_2O_5	%	1,04	1,93
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	TREO+Y	ppm óxidos	2509,17	3110,71
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	MREO	ppm óxidos	705,40	860,72
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	145,82	177,39
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	Nd_2O_3	ppm óxidos	540,16	660,18
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	Dy_2O_3	ppm óxidos	15,45	18,49
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	Tb_4O_7	ppm óxidos	3,98	4,66
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	TiO_2	%	9,60	11,23
RAD	Duplicata de campo	PTR000280	AUGTR_0041	1–2 m	PTR000290	PTR000317	P_2O_5	%	0,31	0,32
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	TREO+Y	ppm óxidos	2182,89	2853,92
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	MREO	ppm óxidos	498,28	647,85
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	105,78	139,96
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	Nd_2O_3	ppm óxidos	367,30	481,84
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	Dy_2O_3	ppm óxidos	20,90	21,46
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	Tb_4O_7	ppm óxidos	4,30	4,59
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	TiO_2	%	5,09	4,49
RAD	Duplicata de campo	PTR000300	AUGTR_0043	5–6 m	PTR000310	PTR000318	P_2O_5	%	1,01	1,12

Empresa QA/QC	Tipo de duplicata	Sample par	Furo	Intervalo	Código original	Código duplicata	Analito	Unidade	Valor original	Valor duplicata
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	TREO+Y	ppm óxidos	1173,85	1112,34
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	MREO	ppm óxidos	296,95	277,19
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	60,07	56,94
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	Nd_2O_3	ppm óxidos	220,33	204,82
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	Dy_2O_3	ppm óxidos	13,93	12,90
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,61	2,53
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	TiO_2	%	5,42	5,11
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000019	AUGTR_0003	6–7 m	PTR000019	PTR000019	P_2O_5	%	2,63	2,73
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	TREO+Y	ppm óxidos	1712,19	1778,92
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	MREO	ppm óxidos	397,24	418,46
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	82,44	85,27
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	Nd_2O_3	ppm óxidos	288,33	305,36
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	Dy_2O_3	ppm óxidos	22,15	23,34
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	Tb_4O_7	ppm óxidos	4,32	4,48
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	TiO_2	%	6,57	6,81
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000038	AUGTR_0007	2–3 m	PTR000039	PTR000039	P_2O_5	%	2,66	2,65
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	TREO+Y	ppm óxidos	710,26	734,04
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	MREO	ppm óxidos	162,15	168,48
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	31,62	32,59
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	Nd_2O_3	ppm óxidos	118,97	123,99
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	Dy_2O_3	ppm óxidos	9,78	10,01
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,78	1,89
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	TiO_2	%	4,82	4,87
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000066	AUGTR_0012	2–3 m	PTR000069	PTR000069	P_2O_5	%	1,43	1,45
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	TREO+Y	ppm óxidos	681,77	663,74
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	MREO	ppm óxidos	157,93	155,99
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	34,36	32,74
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	Nd_2O_3	ppm óxidos	111,62	111,51
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	Dy_2O_3	ppm óxidos	10,07	10,00
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,88	1,74
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	TiO_2	%	4,40	4,44
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000085	AUGTR_0014	3–4 m	PTR000089	PTR000089	P_2O_5	%	1,21	1,23
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	TREO+Y	ppm óxidos	1159,14	1194,25
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	MREO	ppm óxidos	239,91	248,84
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	51,83	53,68
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	Nd_2O_3	ppm óxidos	171,46	177,64
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	Dy_2O_3	ppm óxidos	14,17	14,91
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,45	2,61
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	TiO_2	%	4,14	4,17
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000114	AUGTR_0017	8–8,8 m	PTR000119	PTR000119	P_2O_5	%	2,55	2,68
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	TREO+Y	ppm óxidos	1055,57	1006,20
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	MREO	ppm óxidos	244,11	232,19
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	51,63	49,55
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	Nd_2O_3	ppm óxidos	177,53	168,08
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	Dy_2O_3	ppm óxidos	12,59	12,28
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,36	2,28
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	TiO_2	%	6,17	6,15
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000133	AUGTR_0020	1–2 m	PTR000139	PTR000139	P_2O_5	%	1,05	1,07
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	TREO+Y	ppm óxidos	693,73	691,73
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	MREO	ppm óxidos	137,19	134,93
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	27,60	27,45
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	Nd_2O_3	ppm óxidos	94,83	92,73
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	Dy_2O_3	ppm óxidos	12,46	12,42
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,31	2,33
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	TiO_2	%	5,66	5,71
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000157	AUGTR_0022	8–8,5 m	PTR000163	PTR000163	P_2O_5	%	0,96	1,00
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	TREO+Y	ppm óxidos	1357,27	1421,98
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	MREO	ppm óxidos	306,88	322,90
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	64,67	68,86
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	Nd_2O_3	ppm óxidos	225,58	236,78
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	Dy_2O_3	ppm óxidos	13,68	14,29
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,94	2,98
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	TiO_2	%	6,98	7,18
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000177	AUGTR_0025	9–10 m	PTR000183	PTR000183	P_2O_5	%	1,71	1,71
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	TREO+Y	ppm óxidos	779,16	789,94
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	MREO	ppm óxidos	162,23	164,51
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	33,18	34,22
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	Nd_2O_3	ppm óxidos	115,82	117,57
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	Dy_2O_3	ppm óxidos	11,13	10,56
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,09	2,16
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	TiO_2	%	4,58	4,53
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000196	AUGTR_0027	9–10 m	PTR000202	PTR000202	P_2O_5	%	2,16	2,24
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	TREO+Y	ppm óxidos	1062,89	1022,51
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	MREO	ppm óxidos	220,48	211,03
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	43,23	41,80
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	Nd_2O_3	ppm óxidos	164,70	156,30
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	Dy_2O_3	ppm óxidos	10,38	10,73
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,18	2,20
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	TiO_2	%	5,75	5,59
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000219	AUGTR_0030	0–1 m	PTR000229	PTR000229	P_2O_5	%	1,73	1,62
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	TREO+Y	ppm óxidos	422,61	454,29
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	MREO	ppm óxidos	86,57	95,08
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	12,79	14,82
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	Nd_2O_3	ppm óxidos	64,62	71,38
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	Dy_2O_3	ppm óxidos	7,77	7,52
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	Tb_4O_7	ppm óxidos	1,39	1,35
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	TiO_2	%	4,48	4,50
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000239	AUGTR_0032	5–6 m	PTR000249	PTR000249	P_2O_5	%	1,26	1,26
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	TREO+Y	ppm óxidos	1526,62	1501,54
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	MREO	ppm óxidos	391,29	385,90
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	78,67	77,59
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	Nd_2O_3	ppm óxidos	294,98	290,90
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	Dy_2O_3	ppm óxidos	14,39	14,14
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	Tb_4O_7	ppm óxidos	3,25	3,27
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	TiO_2	%	8,09	7,93
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000273	AUGTR_0038	1–2 m	PTR000283	PTR000283	P_2O_5	%	0,59	0,52
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	TREO+Y	ppm óxidos	837,22	829,72
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	MREO	ppm óxidos	212,81	207,76
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	Pr_6O_{11}	ppm óxidos	41,86	42,02
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	Nd_2O_3	ppm óxidos	157,58	152,92
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	Dy_2O_3	ppm óxidos	11,12	10,63
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	Tb_4O_7	ppm óxidos	2,25	2,20
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	TiO_2	%	5,18	5,12
SGS	Duplicata laboratorial	PTR000293	AUGTR_0042	7–8 m	PTR000303	PTR000303	P_2O_5	%	2,27	2,48

Projeto	Furo ID	Prof. (m)	Furo ID	Prof. (m)
PTRP	AUGTR_0001	6	AUGTR_0023	4,50
PTRP	AUGTR_0002	5,2	AUGTR_0024	4,30
PTRP	AUGTR_0003	7	AUGTR_0025	12,70
PTRP	AUGTR_0004	6,75	AUGTR_0026	5,75
PTRP	AUGTR_0005	5,5	AUGTR_0027	13,50
PTRP	AUGTR_0006	2,4	AUGTR_0028	12,40
PTRP	AUGTR_0007	6	AUGTR_0029	4,30
PTRP	AUGTR_0008	4,4	AUGTR_0030	8,75
PTRP	AUGTR_0009	4,1	AUGTR_0031	5,60
PTRP	AUGTR_0010	4,2	AUGTR_0032	12,00
PTRP	AUGTR_0011	5,4	AUGTR_0033	5,90
PTRP	AUGTR_0012	4,5	AUGTR_0034	9,00
PTRP	AUGTR_0013	12,40	AUGTR_0035	3,00
PTRP	AUGTR_0014	8,50	AUGTR_0036	3,20
PTRP	AUGTR_0015	6,80	AUGTR_0037	4,00
PTRP	AUGTR_0016	7,20	AUGTR_0038	2,60
PTRP	AUGTR_0017	8,80	AUGTR_0039	2,70
PTRP	AUGTR_0018	9,70	AUGTR_0040	0,50
PTRP	AUGTR_0019	6,50	AUGTR_0041	6,50
PTRP	AUGTR_0020	7,00	AUGTR_0042	8,25
PTRP	AUGTR_0021	9,15	AUGTR_0043	9,00
PTRP	AUGTR_0022	8,50		