

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FRANCISCO SIQUEIRA WOLLMANN

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO E COMPORTAMENTO ESPACIAL DOS
ELEMENTOS TERRAS RARAS PRESENTES EM ROCHAS E PLANTAS NA
REGIÃO DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL**

Caçapava do Sul

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FRANCISCO SIQUEIRA WOLLMANN

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO E COMPORTAMENTO ESPACIAL DOS
ELEMENTOS TERRAS RARAS PRESENTES EM ROCHAS E PLANTAS NA
REGIÃO DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL**

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

Orientadora: Luciana Arnt Abichéquer

Caçapava do Sul

2024

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) .

W863 Wollmann, Francisco Siqueira
ANÁLISE DA CORRELAÇÃO E COMPORTAMENTO ESPACIAL DOS
ELEMENTOS TERRAS RARAS PRESENTES EM ROCHAS E PLANTAS NA REGIÃO
DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL / Francisco Siqueira
Wollmann.

71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2024.

"Orientação: Luciana Arnt Abichéquer " .

1. Elementos Terras raras . 2. Análise Estatística . 3.
Integração geofísica de dados . I. Título.

FRANCISCO SIQUEIRA WOLLMANN

Análise da correlação e comportamento espacial dos elementos terras raras presentes em rochas e plantas da região do Complexo Intrusivo Lavras do Sul.

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 11 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Professora Dra^a Luciana Arnt Abichequer
Orientadora
Universidade Federal do Pampa

Professor Luis Eduardo de Souza
Universidade Federal do Pampa

Professor Dr. Maximilian Fries
Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **LUCIANA ARNT ABICHEQUER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2024, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2024, às 17:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2024, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FRANCISCO SIQUEIRA WOLLMANN, Aluno**, em 20/07/2024, às 09:28, 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 **1492133** e o código CRC **B073ECE6**.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Mariângela e José, aos meus padrinhos Márcia e Cláudio e aos meus irmãos Vinicius e Vitor que sempre acreditaram em mim, me deram todo o suporte necessário e sempre incentivaram meus estudos.

AGRADECIMENTOS

A professora Dra. Luciana Arnt Abichéquer por ter me orientado e acompanhado ao longo destes semestres, por ter me incentivado a sempre buscar mais, instigando a minha criatividade e me fazendo melhorar a cada correção.

Aos professores Dr. Luis Eduardo Souza e Dr. Maximilian Fries por todas as considerações e críticas relevantes recebidas na realização do TCC I.

A geóloga, colega de curso e namorada Giovanna Rocha dos Santos por todas as sugestões e suporte dado ao longo destes anos todos, obrigado por estar ao meu lado.

Ao projeto CNPq de Geoquímica de elementos terras raras e correlatos na região central do estado do Rio Grande do Sul (Chamada N° 27/22 e processo 407805/2022-2) por permitir a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de curso que estiveram comigo ao longo desta caminhada, em especial aos meus amigos Valquíria e Alisson que me acompanharam lado a lado durante a graduação.

A todos os docentes que compartilharam comigo um pouco de seu conhecimento visando meu crescimento como profissional e futuro colega de profissão.

E a UNIPAMPA, em especial ao campus Caçapava do Sul, por ter me dado a oportunidade e as condições possíveis para um ensino de qualidade.

“Se avexe não, toda caminhada começa no primeiro passo a natureza não tem pressa segue seu compasso inexoravelmente chega lá”

Flávio José

RESUMO

Os elementos terras raras são dezessete metais de transição, sendo quinze pertencentes ao grupo dos lantanídeos e dois ao grupo três da tabela periódica. Sua utilização começou no século XIX, em lâmpadas a gás e atualmente são considerados os elementos da terceira onda, devido ao seu uso na área de energias renováveis, metalurgia, agricultura e indústria de alta tecnologia. Com isso, houve um aumento da demanda e uma crescente onda de estudos e pesquisas que visam ampliar a produção destes elementos. Estes elementos são encontrados em maior abundância em rochas associadas à crosta terrestre, como granitos, rochas alcalinas, carbonatitos e em depósitos tipo *placer*. Além disso, os elementos terras raras podem ser encontrados em plantas, devido à adsorção destes elementos presentes no substrato, pelas raízes das plantas. No presente trabalho, analisou-se a existência de correlação e o comportamento no espaço, vinculando com a litologia, dos elementos terras raras em rochas e plantas do Complexo Intrusivo Lavras do Sul. Para isto, foi utilizado um banco de dados obtido em bibliografias disponíveis, composto por análises químicas de elementos maiores, traço e elementos terras raras. Neste banco de dados foi aplicada análise estatística uni e bivariada, como identificação das medidas de tendência. A geofísica também foi utilizada como ferramenta por meio dos métodos da gamaespectrometria e magnetometria, para identificar pontos anômalos na área de estudo que possam ter ligações com os ETRs. Com base nos estudos realizados, verificou-se uma correlação positiva entre os ETRs presentes nas rochas, com óxido de potássio e tório. Os ETRs presentes nas plantas tiveram uma correlação positiva com o óxido de ferro presente nas rochas. Com relação à geofísica, foi possível correlacionar os dados geofísicos do tório e potássio, com as concentrações destes elementos nas rochas, sendo possível delimitar a área de maior ocorrência dos ETRs de acordo com a litologia presente na área estudada. Obteve-se resultados semelhantes a bibliografia em relação ao método geofísico da magnetometria, por haver uma maior concentração de ETRs nas bordas da intrusão. Assim sendo, a quantidade de ETRs presentes nas rochas, possui uma correlação indireta com a concentração destes elementos nas plantas, pois processos pedogenéticos e os tipos de minerais no solo, são os principais agentes desta concentração.

Palavras-chave: Elementos terras raras; Análise estatística de dados; Integração geofísica de dados.

ABSTRACT

Rare earth elements are seventeen transition metals, with fifteen belonging to the lanthanide group and two to group three of the periodic table. Their utilization commenced in the 19th century, in gas lamps, and they are currently considered third-wave elements, due to their use in renewable energy, metallurgy, agriculture, and high-technology industry. Consequently, there has been an increase in demand and a growing wave of studies and research aimed at expanding the production of these elements. They are found in greater abundance in rocks associated with the Earth's crust, such as granites, alkaline rocks, carbonatites and placer-type deposits. Furthermore, rare earth elements can be found in plants, due to the adsorption of elements present in the substrate, by plant roots. In the present work, we intend to evaluate the existence of manifests and identify the spatial behavior of rare earth elements in rocks and plants of the Lavras do Sul Intrusive Complex. To do this, a database obtained from available bibliographies was used, consisting of chemical analyses of major, trace and rare earth elements. Uni and bivariate statistical analysis was applied to this database to identify trend measures. Geophysics was also used as a tool through the methods of gamma spectrometry and magnetometry, to identify anomalous points in the study area that may have links with ETRs. Based on the studies carried out, a positive correlation was found between the ETRs present in the rocks, with potassium oxide and thorium. The ETRs present in the plants had a positive correlation with the iron oxide present in the rocks. With regard to geophysics, it was possible to correlate the geophysical data of thorium and potassium with the concentrations of these elements in the rocks, making it possible to delimit the area of greatest occurrence of ETRs according to the lithology present in the area studied. Results similar to those in the literature were obtained in relation to the magnetometry geophysical method, as there was a higher concentration of ETRs at the edges of the intrusion. Therefore, the amount of ETRs present in the rocks has an indirect correlation with the concentration of these elements in plants, since pedogenetic processes and the types of minerals in the soil are the main agents of this concentration.

Keywords: Rare earth elements; Statistical data analysis; Geophysical integration of data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de acesso e localização da área de estudo	14
Figura 2 - Geologia regional da área de estudo	16
Figura 3 – Geologia local da área de estudo.....	18
Figura 4 - Representação das medidas de tendência central em um histograma hipotético.....	24
Figura 5 - Fluxograma exemplificando etapas dos materiais e métodos.....	34
Figura 6 - Mapa de localização do óxido de potássio, cério e lantânio.	40
Figura 7 - Mapa de localização do tório, cério e lantânio.	41
Figura 8 - Mapa de localização do óxido de ferro, cério e lantânio.	43
Figura 9 - Comparação do tório na aerogeofísica com a distribuição do elemento no banco de dados.....	47
Figura 10 - Comparação do potássio na aerogeofísica com a distribuição do elemento no banco de dados.....	48
Figura 11 - Comparação da aeromagnetometria com a distribuição do óxido de ferro nas rochas.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas descritivas dos elementos maiores e elementos traço.....	37
Tabela 2 - Medidas descritivas dos elementos terras raras	38
Tabela 3 – Correlação entre os ETRs presentes nas rochas, os óxidos e elementos traço.	39
Tabela 4 - Correlação entre os ETRs presentes nas plantas e os óxidos.....	42
Tabela 5 – Correlação entre os ETRs presentes nas rochas	44
Tabela 6 - Correlação entre os ETRs presentes nas plantas.....	44
Tabela 7 – Correlação não linear entre os ETRs presentes nas rochas e óxidos.	45
Tabela 8 - Correlação não linear entre os ETRs presentes nas plantas e óxidos.	46

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

CILS – Complexo Intrusivo Lavras do Sul

ETR – Elementos Terras Raras

ETRL – Elementos Terras Raras Leves

ETRP – Elementos Terras Raras Pesados

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry

Ma – Milhões de anos

mE – Metros Leste

mS – Metros Sul

PNM – Plano Nacional de Mineração

ppm – Partes por milhão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS.....	12
3 JUSTIFICATIVA.....	12
4 ÁREA DE ESTUDO	13
5 CONTEXTO GEOLÓGICO	14
5.1 Geologia regional da área.....	14
5.2 Geologia local.....	16
6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
6.1 Elementos terras raras.....	18
6.2 Minerais de elementos terras raras	19
6.3 Depósitos de elementos terras raras	20
6.3.1 Carbonatitos	20
6.3.2 Rochas peralcalinas subsaturadas em sílica e pegmatitos	20
6.3.3 Granitos peralcalinos.....	21
6.3.4 Depósitos Tipo <i>placer</i>.....	21
6.4 Ocorrência dos ETR em plantas	21
6.4.1 Carqueja	22
6.5 Análise estatística	23
6.5.1 Medidas de tendência central	23
6.5.2 Dispersão dos valores ao redor da média	24
6.5.3 Medidas de forma.....	25
6.5.4 Distribuição de frequências	26
6.5.5 Correlação.....	27
6.5.6 Regressão linear	28
6.6 Mapas de localização	29

6.7 Geofísica: métodos e aplicações	29
6.7.1 Geofísica na identificação de ETRs	30
6.8 Estado da arte	31
7 MATERIAIS E MÉTODOS	33
7.1 Revisão bibliográfica	33
7.2 Análise estatística	34
7.2.1 Tratamento dos dados e sumário estatístico	34
7.2.2 Correlação	35
7.2.3 Análise geofísica	35
7.2.4 Comparação dos resultados e análise espacial	35
8. Resultados e discussões	35
8.1 Banco de dados	35
8.2 Estatística univariada	36
8.3 Estatística bivariada	38
8.3.1 Análise da correlação entre elementos maiores e traço com ETRs nas rocha	38
8.3.2 Análise da correlação entre elementos maiores e traço com ETRs nas plantas	41
8.3.3 Análise da correlação dos ETRs entre si	44
8.3.4 Correlação não linear dos dados	44
8.4. Correlação dos dados geológicos e geofísicos	46
9. Considerações finais	51
REFERÊNCIAS	53
ANEXO A	62
ANEXO B	63
ANEXO C	64

1 INTRODUÇÃO

Os Elementos Terras Raras (ETR) foram identificados pela primeira vez em 1800, quando Carl Axel Arrhenius descreveu um mineral composto por $Y_2Fe_2Be_2Si_2O_{10}$ e o nomeou de Yterbita, pois a amostra foi retirada próximo à região de Ytterby, na Suécia (Chakhmouradian; Wall, 2012). Segundo as recomendações da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), hoje, a família dos ETR é composta por dezessete metais de transição, sendo quinze pertencentes ao grupo dos lantanídeos, além do Ítrio e Escândio, pertencentes ao grupo 3 da tabela periódica, que possuem propriedades físico-química semelhantes ao grupo dos lantanídeos (Chakhmouradian; Wall, 2012).

De acordo com suas propriedades, os ETR são subdivididos em dois grupos: Terras Raras Leves (ETRL), que abrangem o Lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd), Promécio (Pm) e Samário (Sm); e Terras Raras Pesados (ETRP), que abrangem os elementos Gadolínio (Gd), Térbio (Tb), Disprósio (Dy), Hólmio (Ho), Érbio (Er), Túlio (Tm), Itérbio (Yb) e Lutécio (Lu). O Ítrio (Y) é inserido no grupo dos ETRP por conta das suas propriedades serem muito semelhantes ao Hólmio, enquanto o Európio é inserido nos dois grupos.

A utilização destes elementos na indústria começou por volta do século XIX, sendo usados em lâmpadas a gás, melhorando a iluminação artificial (Martins; Isolini, 2005). Os ETR são chamados de elementos da terceira onda, devido a sua ampla aplicação na metalurgia, na área de energias renováveis, indústria petrolífera, agricultura e na indústria de alta tecnologia, onde se utiliza, por exemplo, o Neodímio para fabricação de super ímã, usado em carros elétricos e o Európio como componente em telas de computador (Takehara *et al.*, 2015).

Em termos de produção, a China é, há décadas, o maior produtor de Elementos Terras Raras, sendo responsável por, em média, cerca de 90% da produção mundial e possui cerca de 50% das reservas mundiais de ETR, sendo seguida pelo Brasil, Austrália e Índia (Van Gosen *et al.*, 2017).

Com o crescente aumento da indústria de alta tecnologia, a demanda pelos ETR vem incentivando a busca por novos depósitos minerais, bem como a reabertura de minas. A implementação de cotas de exportação de ETR feita pela China, maior

produtora do mundo, fez com que a demanda por estes elementos aumentasse a partir dos anos 2000, intensificando ainda mais esta busca por novos depósitos. O Brasil, até a metade do século XX, foi o maior produtor de elementos terras raras no mundo, mas com o aumento da produção em países como os Estados Unidos, a produção no país diminuiu em relação aos demais (Rocio *et al.*, 2012).

A ocorrência destes elementos é comum na crosta terrestre, porém não em concentrações economicamente viáveis. Estes elementos ocorrem em diferentes tipos de litologia como minerais acessórios de granitos, carbonatitos e em depósitos tipo *placer*, influenciados por processos hidrotermais, diferenciação magmática e ainda, como derivados de processos superficiais (Takehara *et al.*, 2015). Além disso, sabe-se também que as plantas tendem a refletir a concentração de elementos terras raras presentes no seu substrato, pela interação de suas raízes com o solo (Cunha; Nardi; Formoso, 2010), o que é demonstrado, normalmente, por meio de correlações entre as concentrações de ETR encontrados nas amostras de rochas e de plantas de determinada região.

A geofísica vem sendo uma grande aliada na identificação de ocorrência dos ETRs ao longo de diferentes tipos de rocha, por meio de métodos como gamaespectrometria e magnetometria, que fornecem um meio de delinear as características geológicas em áreas amplas, como é o caso do depósito de óxido de ferro-apatita em New York, nos Estados Unidos, em mineralizações de pegmatitos ricos em terras raras em *Alces Lakes*, Canadá e em estudos no granito de Acari, no Rio Grande do Norte, Brasil (Costa; Oliveira; 2018; Shah *et al.*, 2021; Poliakovska; Annesley; Hajnal, 2023).

Na região do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) foi mapeada a ocorrência de elementos terras raras, no trabalho de Liz (2008), comprovando a presença destes elementos com a série de rochas shoshoníticas, bem como nos trabalhos de Maturana Filho (2015) e Barreiro (2017), que diagnosticaram, caracterizaram e estudaram o comportamento dos elementos na região do Complexo Intrusivo Lavras do Sul.

Levando em consideração os aspectos descritos, ao decorrer deste trabalho utilizou-se estatística uni e bivariada nas amostras de rochas e plantas identificando a correlação dos ETRs, elementos maiores e elementos traços. Para analisar a relação espacial dos ETRs com a litologia da área de estudo mapas de localização das variáveis estudadas, foram comparados com dados geológicos e geofísicos do CILS. Por fim, buscou-se relacionar os resultados obtidos com os dados estatísticos,

geológicos e geofísicos para compreender a disponibilidade dos ETRs em rochas e plantas e se as concentrações destes elementos nas plantas refletem, de forma indireta ou direta, o substrato rochoso onde estão inseridas.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a correlação e identificar uma possível relação espacial das concentrações dos elementos terras raras em rochas e plantas com a litologia presente no Complexo Intrusivo Lavras do Sul

Assim, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- verificar uma possível correlação dos ETRs entre si e com elementos maiores e traço, tanto em rochas, quanto em plantas;
- identificar se as concentrações de ETRs nas rochas, contribuem para acumulação destes elementos nas plantas da área de estudo e
- verificar a contribuição dos métodos geofísicos para a identificação de concentrações anômalas de ETRs e para correlação com dados geológicos e geoquímicos.

3 JUSTIFICATIVA

Com o aumento da demanda dos elementos terras raras, o Brasil, detentor da segunda maior reserva do mundo, em seu Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM 2030) considerou estes elementos como estratégicos para o país, incentivando assim o aumento de projetos de pesquisa que visam contribuir com o desenvolvimento de uma cadeia produtiva dos elementos terras raras (Takehara *et al*, 2015).

Desde 2013 vem se estudando os elementos terras raras em Caçapava do Sul e região, visando contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da região. Dentre os trabalhos de pesquisa realizados, destacam-se: i) Maturana Filho (2015), que realizou uma caracterização das concentrações de elementos terras raras nas áreas de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e Lavras do Sul; ii) o trabalho realizado por Morales (2017), dando ênfase no comportamento dos elementos terras raras do carbonatito Passo Feio por meio de sua petrologia; e iii) o trabalho de Barreiro (2017),

visando o comportamento de elementos terras raras no sistema planta e rocha, realizado em Lavras do Sul.

A pesquisa nestas áreas se dá pela semelhança de litologia de depósitos de elementos terras raras explorados no Brasil e no mundo, como o depósito de Catalão I, em Goiás, e o depósito de Araxá, em Minas Gerais, que explotam os ETRs associados a carbonatitos e o depósito tipo placer de Pitinga, no Amazonas, onde as mineralizações tiveram origem em corpos graníticos.

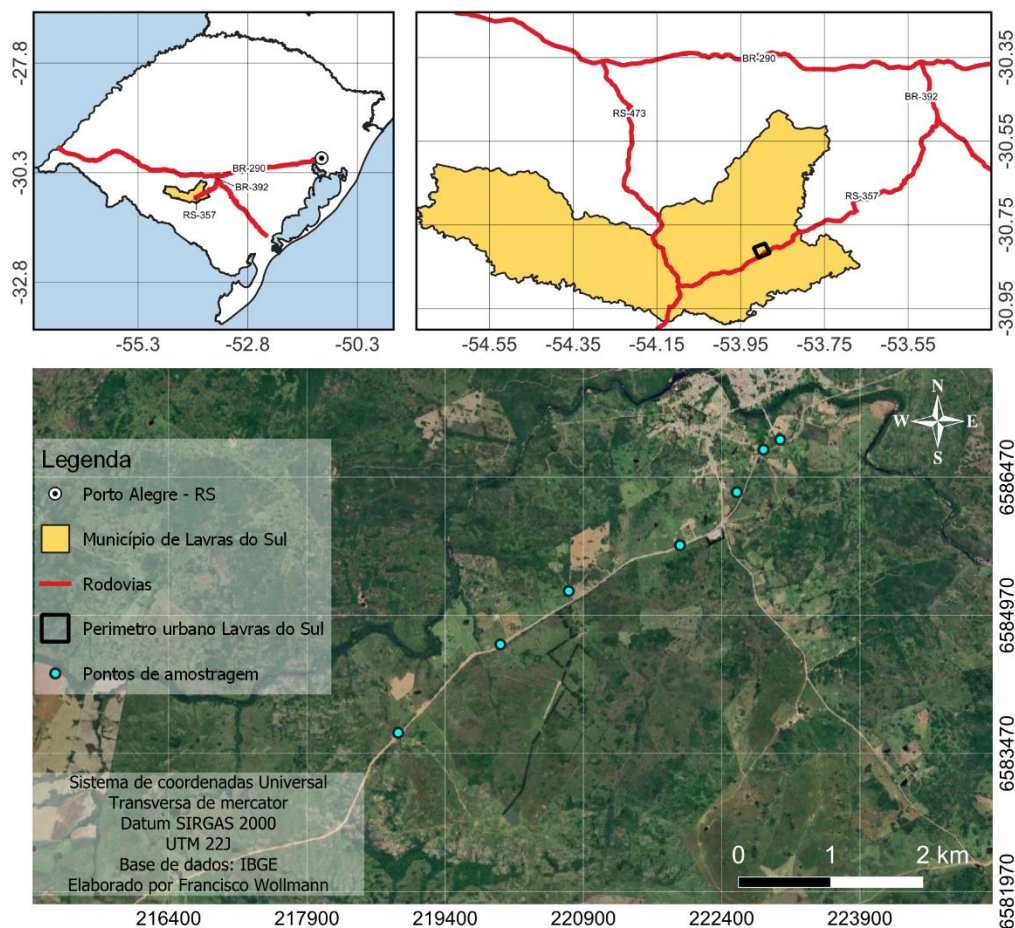
O presente trabalho se diferencia de outros já realizados, pois busca analisar a correlação dos elementos terras raras e a distribuição dos mesmos em rochas e plantas na área de estudo, buscando correlacionar com a litologia, identificando se há influência dela para concentração de ETRs em plantas no Complexo Granítico de Lavras do Sul, visando contribuir com o desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas a estes elementos, contando com o apoio da CNPq com um projeto voltado ao estabelecimento de modelos de depósitos minerais com foco em minerais estratégicos.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada em Lavras do Sul, na porção sudoeste do Escudo Sul Rio-grandense, estando distante 320 km de Porto Alegre e a 60 km de Caçapava do Sul. O acesso é realizado pela BR-290 seguindo no sentido oeste até o entroncamento da BR-392, acessando o sentido sudeste até a cidade de Caçapava do Sul, onde deve-se acessar a RS-357, sentido sudoeste, percorrendo cerca de 60 km até o município de Lavras do Sul.

A região está inserida na folha Lavras do Sul (SH-Y-A-IV-3MI), sendo um perfil ao longo da estrada RS-357, com cerca de 6 Km de extensão, contendo um total de 7 amostras de rochas e plantas. A região estudada é delimitada pelas coordenadas UTM iniciais, na zona 22J, de 223036.00 mE e 6586876.00 mS e finais de 218891.00 mE e 6583694.00 mS (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de acesso e localização da área de estudo



Fonte: Adaptado de Fundação Instituto de Geografia e Estatística – IBGE (2020).

5 CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1 Geologia regional da área

Lavras do Sul está localizada na porção oeste do Escudo Sul Rio-grandense (Figura 2), no domínio do Arco São Gabriel e o Complexo Cambaí representa seu embasamento, tendo como rochas os metaultramafitos Cerro da Mantiqueira, a Sequência Marmeleiro composta por rochas metassedimentares, metagranitóides e gnaisses cálcio-alcalinos. Sob o Complexo estão os metamorfitos Arroio da Porteira, cobertos por rochas arcoseanas da Formação Maricá e sobre esta formação se encontram depósitos vulcânicos da formação Hilário e Acampamento Velho,

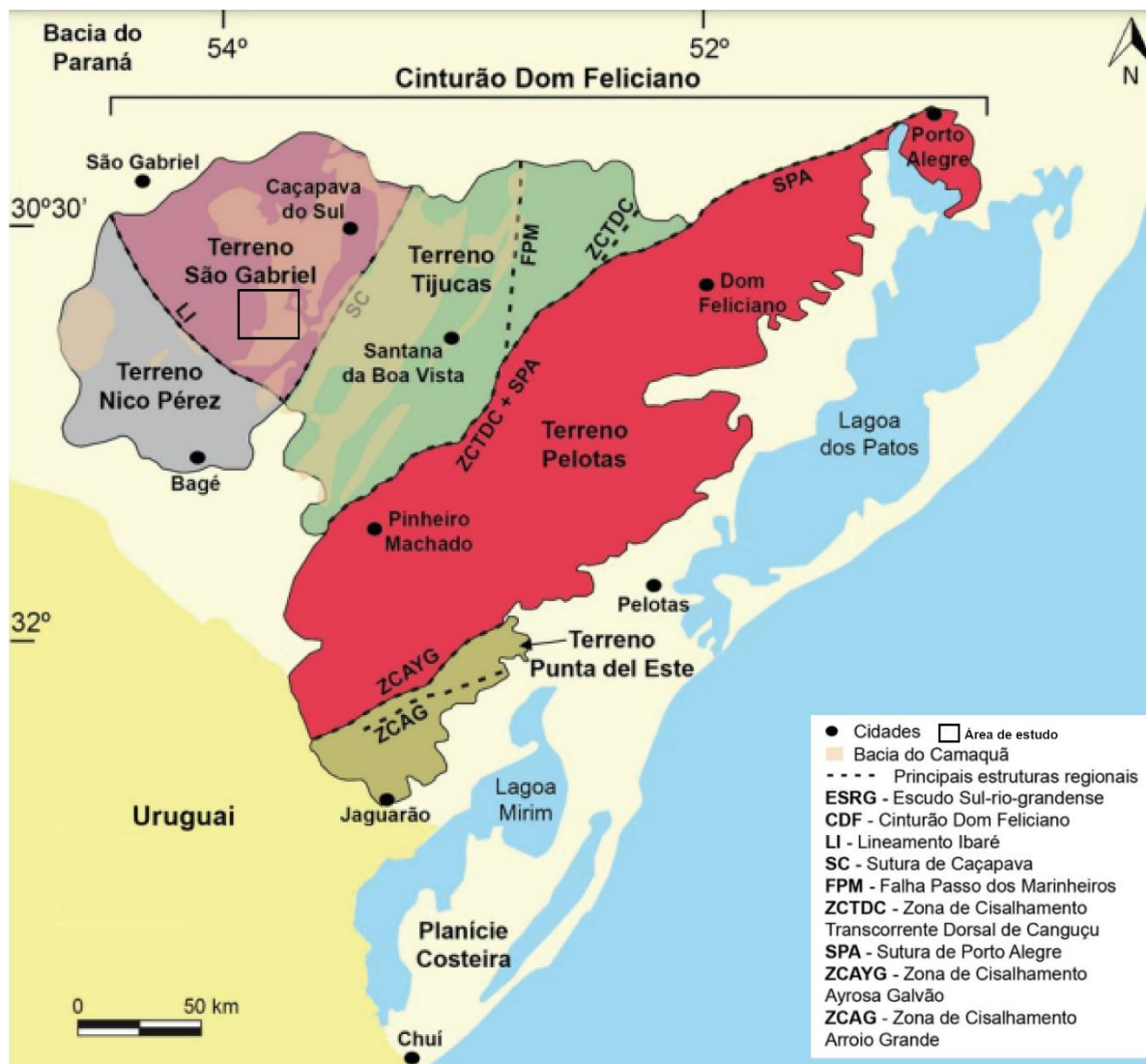
compostos por rochas shoshoníticas e rochas alcalinas. Cobrindo esta sequência, temos as rochas sedimentares da Formação Santa Bárbara (Liz, 2008).

O Escudo Sul Rio-grandense, segundo Chemale Jr. (2000), se divide em quatro terrenos, ígneos e metamórficos: Complexo Granulítico Santa Maria Chico, possuindo rochas metamórficas retrabalhadas no neoproterozóico, Terreno São Gabriel, composto por rochas gnáissicas e vulcanosedimentares, Cinturão Tijucas com rochas granito-gnáissicas, graníticas, anfibolíticas paleoproterozóicas e rochas vulcanosedimentares com cerca de 800-770 Ma e por fim o Cinturão Dom Feliciano, formado por unidades gnáissicas, graníticas e por migmatitos gerados pelo magmatismo datado de 650-590 Ma e por retrabalhamento de crosta paleoproterozoica.

A Bacia do Camaquã corresponde a uma sequência aflorante de rochas Vulcano-sedimentares presentes no Escudo Sul-Riograndense que foram depositadas durante as fases tardi a pós-colisional do Ciclo Brasileiro do Cinturão Dom Feliciano (Paim; Chemale Jr; Lopes, 2000). A bacia está margeada pelos cinturões Tijucas e Dom Feliciano (leste) e a oeste pelo Terreno São Gabriel e Craton Rio de La Plata e possui orientação NE-SW (Paim; Chemale Jr; Wildner, 2014).

Segundo Paim, Chemale Jr. e Lopes (2000), a bacia do Camaquã representa um lócus deposicional dividido em quatro estágios de evolução tectônica, que implicaram em vulcanismos e ciclos de sedimentação específicos, limitados por discordâncias angulares, estando vinculadas a diferentes ambientes tectônicos. A distribuição é subdividida em cinco sub-bacias (alogramos), são elas: Boicí-Piquiri, Guaritas, Santa Bárbara, Ramada e Taquarembó. Nesta divisão temos a sobreposição dos registros de sedimentação em bacias de antepaís de retroarco Maricá, bacias transcorrentes Bom Jardim Oeste e Leste, rifte Santa Bárbara Oeste e Leste e Rifte Guaritas. Onde os alogrupos Maricá e Bom Jardim, mais antigos, tiveram deposição influenciada por um ambiente dúctil-rúptil, podendo ter ocorrido em um regime compressivo ou transpressivo, devido à presença de dobras moderadamente apertadas (Paim; Chemale Jr; Lopes, 2000). Os alogrupos mais jovens, Santa Bárbara e Guaritas, possuem deposição de origem continental influenciada pelo final da tectônica transcorrente sinistral, possuindo dobras de arraste amplas e suaves (Chemale Jr., 2000).

Figura 2 - Geologia regional da área de estudo



Fonte: Extraído e adaptado de Koester *et al.*, (2021);

5.2 Geologia local

A área de estudo (Figura 3) compreende rochas constituídas por um núcleo monzogranítico a granodiorítico, gerado por assimilação parcial de magmas graníticos mais jovens, responsáveis por gerar peritita granitos que ocorrem nas bordas sul, oeste e norte do pluton possuindo características geoquímicas de rochas shoshoníticas. (NARDI, 1984).

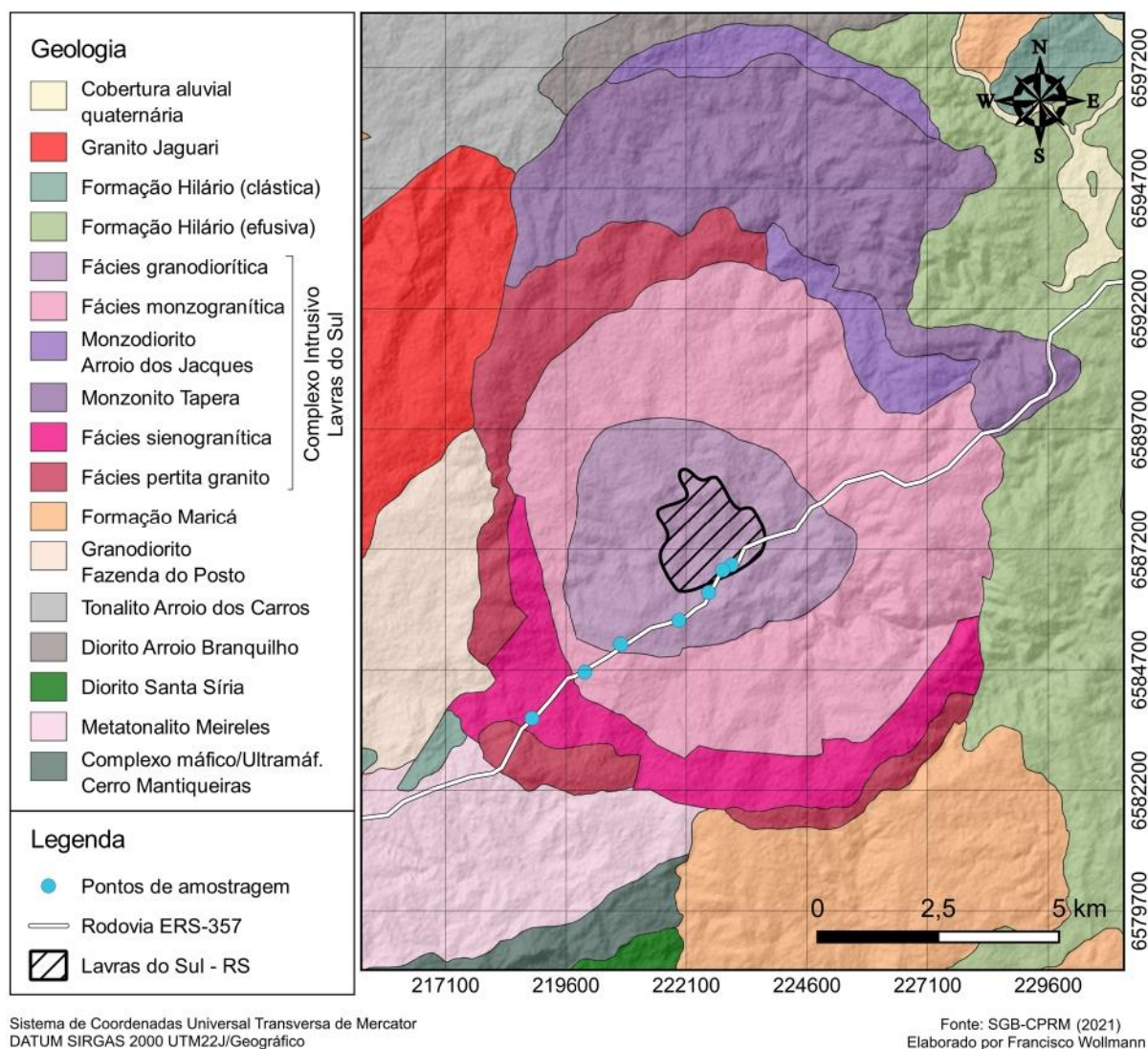
Gastal *et al.* (2006) divide o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) em dois setores, norte e sul. Ao norte está o monzonito Tapera, constituído por quartzo monzonito, monzonito, monzodiorito e diorito. Ao Sul, encontra-se o Monzodiorito

Arroio do Jacques composto por dioritos e monzodioritos, que circundam o corpo granítico principal (Gastal *et al.*, 2006).

A área que compreende o maior número de amostras na área de estudo corresponde a uma intrusão granítica com zonalidade reversa de fácies, álcali-cálcicas e alcalinas, sendo composta por granodioritos, monzogranitos, sienogranitos e pertita granitos (Gastal *et al.*, 2006).

No que diz respeito à petrografia dos granitos do núcleo, os granodioritos apresentam textura seriada a porfirítica com grãos variando de grossos a finos, contendo contrastes texturais e exsolução de voláteis em algumas feições (Gastal *et al.*, 2006). Os monzogranitos possuem dois tipos de textura, equigranular média ou seriada variando de média a fina e feições de dissolução de plagioclásio (Gastal *et al.*, 2006). Em relação à petrografia dos granitos alcalinos, os sienogranitos apresentam uma bimodalidade textural, variando de grossa a média e feições de hibridismo restritas, possuindo em sua associação mineral oligoclásio a albita cálcica, albita tardia além de possuir como minerais acessórios principais Titanita, rica em elementos terras raras, Nióbio (Nb) e Ítrio (Y) e Ti-Magnetita (Gastal *et al.*, 2006). O pertita granito possui uma textura equigranular média a grossa, com agregados de K-Feldspato ou quartzo e varia para uma textura seriada média a fina, com reabsorção de plagioclásio pelo K-Feldspato.

Figura 3 – Geologia local da área de estudo



Fonte: Extraído e adaptado de Serviço geológico do Brasil (2021);

6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1 Elementos terras raras

A família dos lantanídeos, que formam os elementos terras raras junto com o Ítrio (Y) e o Escândio (Sc), pode ser dividida em ETR leves (ETRL), do Lantânio (La) ao Európio (Eu) e os ETR Pesados (ETRP), do Gadolínio (Gd) ao Lutécio (Lu).

Os ETR são utilizados como indicadores geoquímicos, sendo a configuração eletrônica de cada elemento a responsável pela mudança do comportamento

geoquímico e por importantes implicações nas suas propriedades. Os Elementos Eu, Tb e Sm podem ocorrer em dois estados de valência, sendo o Eu^{2+} mais comum de ser encontrado, tornando-se alvo em estudos de processos magmáticos. Já o Sc, Y e La possuem apenas um estado de valência, o (3+), devido à diminuição progressiva de seu raio iônico, uma particularidade dos ETR. Elementos como Ce, Tb e Pr podem ocorrer como cátions tetravalentes (Takehara *et al.*, 2015).

Uma característica dos ETR é possuir um baixo potencial de ionização, tornando-os altamente eletropositivos, esta característica diferencia os elementos entre incompatíveis e compatíveis. Geoquimicamente, elementos incompatíveis têm afinidade com a fase líquida do magma e elementos compatíveis com a fase mineral (Takehara *et al.*, 2015).

Segundo Henderson (1984), apenas os ETR que não ocorrem em estado trivalente (+3) são compatíveis, os outros elementos tendem a ser incompatíveis e seu comportamento litófilo, ou seja, que possui afinidade com oxigênio, os leva a se concentrar em minerais silicáticos.

A concentração média dos ETR nas rochas presentes na crosta, oscila entre 150 e 220ppm, estando este valor correlacionado ao coeficiente de partição, fluidos transportadores, além das condições de temperatura e pressão, sendo que os carbonatitos e as rochas alcalinas possuem as maiores concentrações já mapeadas de elementos terras raras (Chakhmouradian; Wall, 2012; Long *et al.*, 2010). Logo, a forma como os ETR's estão distribuídos em determinado litotipo, auxilia no reconhecimento da área fonte e dos processos magmáticos geradores das rochas.

6.2 Minerais de elementos terras raras

Diferente de outros minerais que, na maioria das vezes, são extraídos de uma única fase mineral, como o cobre extraído da calcopirita, os ETR ocorrem associados a outros minerais, como mineral acessório, sendo um subproduto do processo de mineração (Long *et al.* 2010). Segundo Chakhmouradian e Wall (2012), cerca de 6% das espécies de minerais contém elementos terras raras, sendo a maior porção encontrada em silicatos, seguida por carbonatos, óxidos e fosfatos que possuem principalmente os elementos Ce, Y, La ou Nd.

Dentre estes minerais, os de maior importância econômica, representando mais de 90% da produção mundial são: bastnaesita $[(\text{Ce},\text{La})(\text{CO}_3)\text{F}]$, um

fluorcarbonato com cerca de 70% de ETR que ocorre principalmente em carbonatitos, sendo encontrado também em rochas alcalinas, extraído de depósitos na China e nos Estados Unidos da América (Mariano; Mariano Jr., 2012). A monazita [(Ce,La,Nd,Th) PO₄], um fosfato encontrado em rochas ígneas e metamórficas e também em depósitos tipo *placer* (Takehara *et al.*, 2015). E a xenotima (YPO₄), um fosfato de Y, comum em granitóides e rochas metamórficas estando associado também à monazita, extraída de depósitos tipo *placer*, produto de intemperismo de rochas graníticas e pegmatitos (Takehara *et al.*, 2015).

6.3 Depósitos de elementos terras raras

Conforme mencionado no item anterior, os depósitos de elementos terras raras podem ser separados por processos magmáticos e os principais litotipos são: carbonatitos, rochas peralcalinas subsaturadas em Sílica, pegmatitos, granitos peralcalinos e depósitos tipo *placer*.

6.3.1 Carbonatitos

Os carbonatitos são rochas ígneas que contém mais de 50% de minerais de carbonato em sua composição e menos de 20% de SiO₂. São formados a partir de magmas advindos de regiões astenosféricas e litosféricas, por imiscibilidade de magmas rico em silicato e carbonato e diferenciação magmática, sendo altamente enriquecidos em ETR com concentrações variando de 250 a 8000 ppm. Pode-se citar como exemplos de jazidas carbonatíticas ricas em terras raras o depósito de Bayan Obo na China, Mountain Pass nos EUA (Chakhmouradian; Zaitsev, 2012), além de Catalão I e II (GO) e Araxá (MG) no Brasil.

6.3.2 Rochas peralcalinas subsaturadas em sílica e pegmatitos

São formadas a partir de um magma supersaturado em álcalis, sendo os ETR associados à apatita e perovskita. As maiores concentrações ocorrem em granitos peralcalinos anorogênicos e pegmatitos (Chakhmouradian; Zaitsev, 2012)

E os pegmatitos são encontrados associados a grandes intrusões graníticas e foram muito explorados no início dos anos 1990, porém, as operações de extração tiveram curta duração, pois as ocorrências possuem baixa tonelagem e teor, apresentando uma mineralogia complicada e com recuperação de minerais de ETR complexa. (Chakhmouradian; Zaitsev, 2012; Long *et al.*, 2010). $(Y, Fe^{3+}, U)(Nb, Ta)O_4$.

6.3.3 Granitos peralcalinos

Os granitos peralcalinos são enriquecidos em elementos terras raras pesados, como xenotima, fergusonita (NbO_4), samarskita $(Y, Fe^{3+}, U)(Nb, Ta)O_4$ e gagarinita $[(Y, Ce) NaF_6]$, associado ao aumento de cristalização fracionada de feldspatos e a baixa solubilidade da monazita em magmas com muita sílica, sendo exemplos de jazidas as argilas iônicas na China e a jazida de Pitinga no estado brasileiro do Amazonas (Chakhmouradian; Zaitsev, 2012).

6.3.4 Depósitos Tipo *placer*

São gerados a partir do intemperismo das rochas, onde os sedimentos passam pelos processos de erosão, transporte e são depositados em ambientes sedimentares continentais, fluviais e marinhos, concentrando minerais mais pesados e formando *placers*. Estes depósitos possuem a maior concentração de monazita e xenotima, e a presença dos ETR está associada à ilmenita e cassiterita (Long *et al.*, 2010).

6.4 Ocorrência dos ETR em plantas

O solo, por definição, é o produto de alteração das rochas, sendo considerado o principal e mais importante meio para desenvolvimento das plantas. É também o responsável pela distribuição dos principais elementos não-minerais como carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) para as plantas, além dos elementos minerais, como ferro (Fe), fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), entre outros, que incluem os elementos terras raras (Batista *et al.*, 2018). O processo pelo qual as plantas absorvem esses elementos é chamado de adsorção, onde os íons presentes no solo são absorvidos pelas plantas, através da rizosfera (Batista *et al.*, 2018).

A concentração de elementos terras raras no solo depende de vários fatores, como as rochas que deram origem ao solo, pedogenética, grau de intemperismo, textura, conteúdo de matéria orgânica e a quantidade de argilominerais presentes (Hu *et al.*, 2006). Segundo Paye *et al.*, (2016), solos que se desenvolvem a partir de rochas ígneas alcalinas apresentam maiores concentrações médias de ETR em comparação com solos gerados por rochas sedimentares, rochas ígneas básicas, rochas ácidas e metamórficas.

Os elementos terras raras podem formar complexos, isso configura o efeito tétrade, que ocorre durante a estabilização dos níveis de configuração eletrônica, formando dois complexos, W e M (Sastri *et al.*, 2003). Assim, quando um fluido lixivia um meio capaz de formar estes complexos, teremos um padrão W, enriquecido em Nd, Gd, Ho-Er e Lu pois sua instabilidade cria uma maior dificuldade de complexação. Já o padrão M representa uma ocorrência onde tem-se uma maior ocorrência dos elementos vizinhos aos citados anteriormente, devido à facilidade destes elementos em formarem complexos (Sastri *et al.*, 2003). O padrão tipo W, é resultado da absorção de íons livres pelo sistema de raízes das plantas, já o padrão M está associado a sistemas hidrotermais onde a supersaturação de água ou flúor durante a diferenciação magmática forma esse complexo (Sastri *et al.*, 2003).

De maneira geral, Zhang *et al.* (2002) observaram que a concentração de elementos terras raras em várias raízes de planta são muito semelhantes entre si, sendo esta concentração associada à disponibilidade de ETR no solo. Segundo os autores, as raízes absorvem os ETR em soluções solúveis, principalmente água. Já nas folhas das plantas, a concentração de ETR é mais variável, sendo este efeito atribuído ao fato de que durante a translocação das raízes até as plantas, os elementos sofrem fracionamento, diminuindo a sua concentração no sistema (Zhang *et al.*, 2002).

6.4.1 Carqueja

A carqueja, de nome científico *Baccharis Trimera*, é uma planta pertencente ao gênero *Baccharis*, pertencente à família Asteraceae e constituído por mais de 500 espécies, sendo muito utilizada no meio medicinal (Borella *et al.*, 2006). Segundo Dunn (2011), algumas plantas, incluindo a Carqueja, podem ser utilizadas como um guia prospectivo, através de análises biogeoquímicas.

Na região próxima à área de estudo, Cunha, Nardi e Muller (2012) pesquisaram a concentração de elementos terras raras e o efeito tétrade em plantas da espécie *Schinus lentiscifolius*, popularmente conhecida como aroeira, onde os autores constataram que as concentrações de ETR nas plantas possuem correlação com as concentrações encontradas no solo e rochas da região de Lavras do Sul.

6.5 Análise estatística

A estatística tem como um de seus objetivos mapear as características de um determinado universo a partir de um conjunto de dados, por meio de uma série de ferramentas matemáticas como: medidas de tendência central, dispersão de valores ao redor da média, medidas de forma, distribuição de frequência, análise de correlação e regressão linear (Sinclair; Blackwell, 2004).

6.5.1 Medidas de tendência central

As medidas de tendência central são agrupamentos de valores num conjunto de dados e são representadas pela média, mediana e moda (Sinclair; Blackwell, 2004).

A média, ou \bar{x} , é a média aritmética simples de um conjunto de dados, sendo representada pela equação 1:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Onde:

x_i é o valor de observação de cada amostra; e

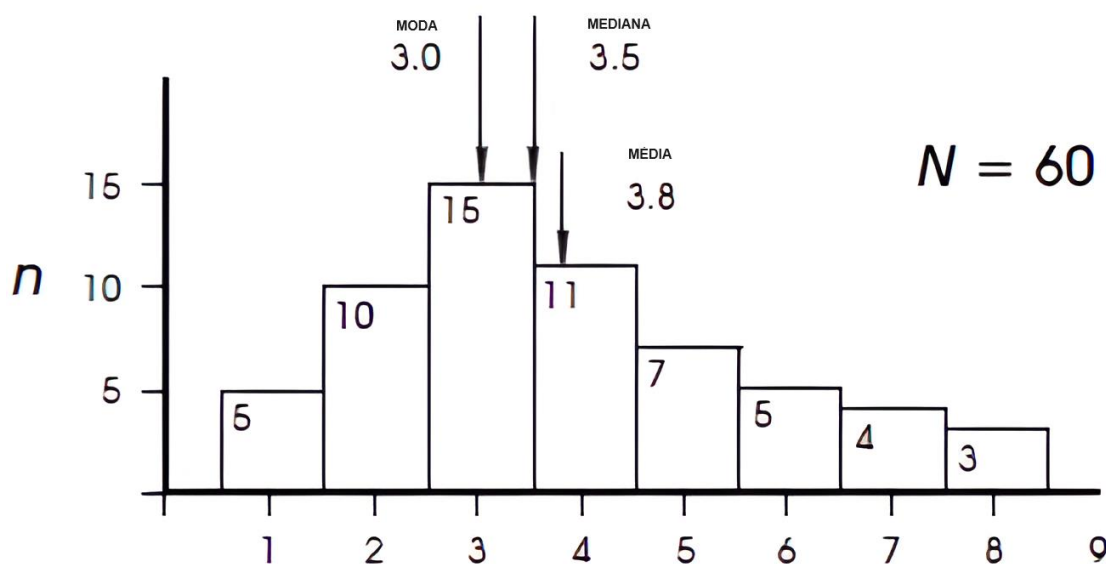
n é o número de dados.

A mediana é o ponto médio de um conjunto de dados, quando o dividimos em duas partes iguais, assim, metade dos dados estão abaixo da mediana e a outra metade acima. Havendo um conjunto de dados ímpar, a mediana é o valor central destes dados, caso o conjunto de dados seja par, a mediana é dada pela média aritmética simples dos dois valores centrais.

A moda é o intervalo de classes de dados que mais se repete na amostragem. O conjunto de dados analisado pode ser amodal (nenhuma moda), unimodal (uma moda) e multimodal (duas ou mais modas).

Na Figura 4, tem-se a representação da média, mediana e moda em um histograma hipotético.

Figura 4 - Representação das medidas de tendência central em um histograma hipotético.



Fonte: Extraído e adaptado de Sinclair; Blackwell, 2004.

6.5.2 Dispersão dos valores ao redor da média

As medidas de dispersão são utilizadas para medir o espalhamento dos dados, ou seja, o quão distante estão os valores em geral, mínimos e máximos da média. Para isso, podemos usar a variância, o desvio padrão e distância interquartil.

A variância (σ^2) é diferença quadrática média dos valores, sendo sensível a valores extremos (Isaaks; Srivastava, 1989), sendo representada pela equação 2:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (2)$$

Onde:

x_i é o valor de observação em cada amostra;

m é a média dos dados; e

n é o número de dados.

O desvio padrão (σ) é a raiz quadrada da variância, usualmente mais aplicado por ter a mesma unidade de medida dos dados originais.

A distância interquartil ou IQR, é a diferença entre o quartil superior (Q_3) e o quartil inferior (Q_1) representado pela equação 3:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

Como a distância interquartil não considera a média dos dados para medir o espalhamento, é frequentemente mais utilizada do que a variância e desvio padrão para medir o grau de espalhamento dos dados, já que é de fácil interpretação: quanto maior o IQR, mais dispersos são os dados, e quanto menor, menos dispersos.

O coeficiente de variação (CV) é utilizado para medir o grau de dificuldade na realização do processo de estimativa. Quando o coeficiente for menor que 1 (um), é um problema simples, caso seja maior que 1 (um), indica uma quantia maior de valores erráticos e aumenta a dificuldade de realização estimativa.

A fórmula do coeficiente de variação é dada pela equação 4:

$$CV = \frac{\sigma}{m} \quad (4)$$

Onde:

σ é o desvio padrão; e

m é a média dos dados.

6.5.3 Medidas de forma

O coeficiente de assimetria (*skewness*) é utilizado para definir a simetria dos histogramas, o que não pode ser feito com as ferramentas estatísticas anteriores (Isaaks; Srivastava, 1989).

O coeficiente de assimetria (CS) sofre uma alta influência de valores erráticos, pois a diferença entre os valores de dados e a média é elevada ao cubo. Por conta disto, a simetria não leva em consideração o resultado do cálculo, mas sim o seu sinal, quando positivo o histograma apresenta uma cauda para a direita, sendo assim a

mediana é menor que a média. Quando o sinal é negativo o histograma apresenta uma cauda para a esquerda, sendo assim, a mediana é maior que a média. O histograma será simétrico quando a mediana estiver próxima da média (Isaaks; Srivastava, 1989).

A fórmula do coeficiente de assimetria (CS) é dada pela equação 5:

$$CS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m)^3}{\sigma^3} \quad (5)$$

Onde:

n é o número de dados;

x_i é o valor de observação em cada amostra;

m é a média dos dados; e

σ é o desvio padrão.

6.5.4 Distribuição de frequências

É utilizada para registrar com que frequência os valores dos dados se enquadram dentro do mesmo intervalo, ou classe, descrevendo como os dados estão distribuídos. A representação gráfica dessa distribuição é chamada de histograma (Sinclair; Blackwell, 2004), onde a altura de cada barra é proporcional à quantidade de dados dentro de cada classe (Isaaks; Srivastava, 1989).

Duas distribuições são comumente utilizadas para avaliação de recursos, a normal, ou gaussiana e a lognormal (Sinclair; Blackwell, 2004). A função de densidade de probabilidade (PDF) normal ou gaussiana é dada pela equação 6:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (6)$$

Onde:

X é a variável aleatória;

μ é a posição central da distribuição; e

σ é a dispersão da distribuição em relação ao ponto x .

Quando o logaritmo dos valores de determinada variável apresentar uma distribuição normal, a distribuição é chamada de lognormal. A função de densidade de probabilidade dada pela equação 7:

$$f(x) = \frac{1}{x\beta\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{\log X - \alpha}{\beta}\right]^2} \quad (7)$$

Onde:

α é a média dos logaritmos de X; e

β é o desvio padrão dos logaritmos de X.

6.5.5 Correlação

As variáveis podem apresentar correlação linear, quando é possível ajustar uma reta entre os pares de amostra no gráfico de dispersão, não lineares, onde há correlação, mas não é possível ajustar uma reta ao conjunto de dados, ou ainda, não possuem correlação alguma.

A correlação é usada para medir a semelhança de variáveis entre vários pares de amostra, onde cada ponto irá representar a correlação entre duas amostras, podendo ser positiva, negativa e não ter correlação. A correlação positiva significa que os valores das variáveis tendem a aumentar juntos (Isaaks; Srivastava, 1989). A correlação negativa ocorre quando os valores de uma variável aumentam e os da outra variável diminuem, como ocorre com ferro e sílica, quando há um aumento de ferro, temos um decréscimo de sílica. E por fim, quando não há correlação, o aumento ou decréscimo dos valores das variáveis não possuem relação entre si. (Isaaks; Srivastava, 1989).

Para calcular a correlação linear (p) entre duas variáveis é comumente utilizada a equação 8:

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

Onde:

n é o número de dados;

x_i são os valores dos dados da primeira variável;

y_i são valores de dados da segunda variável;

Mx é a média dos dados x;

M_y é a média dos dados y ;
 σ_x é o desvio padrão de x ; e
 σ_y é o desvio padrão de y .

Já o coeficiente por postos de Spearman (r_s) ou correlação de rank (ρ_r), é uma alternativa ao coeficiente de Pearson, pois sua única exigência é que as variáveis X e Y sejam medidas pelo menos em escala ordinal, atribuindo postos para cada variável separadamente, permitindo que haja medição de correlações não lineares (Bauer, 2007).

Para calcular a correlação de rank utiliza-se a equação 9, a seguir:

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(R_{x_i} - m_{R_x})(R_{y_i} - m_{R_y})}{\sigma_{R_x} \sigma_{R_y}} \quad (9)$$

Onde:

n é o número de dados;
 R_{x_i} são os valores de rank da primeira variável;
 R_{y_i} são valores de rank da segunda variável;
 m_{R_x} é a média de rank dos dados x ;
 m_{R_y} é a média de rank dos dados y ;
 σ_{R_x} é o desvio padrão de rank da variável x ; e
 σ_{R_y} é o desvio padrão de rank da y .

6.5.6 Regressão linear

É utilizada para estimar os valores de uma variável dependente y , através de uma variável independente x , sendo esta dependência descrita pela equação (10):

$$y = ax + b \quad (10)$$

Onde o ângulo " α " e a constante b , são obtidos por meio das equações (11):

$$\alpha = \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad b = m_y - \alpha x m_x \quad (11)$$

Ao conhecermos o ângulo " α ", podemos estimar o valor da variável dependente, utilizando a média das variáveis (Isaaks; Srivastava, 1989).

6.6 Mapas de localização

Nas geociências, o fato de um conjunto de dados possuir uma determinada localização no espaço permite, além da análise estatística clássica, diversas outras interpretações que auxiliam no entendimento sobre os processos de formação de um depósito, distribuição de teores, entre outros. O uso de mapas ajudam a descrever os aspectos espaciais dos dados, ajudando a identificar padrões altos e baixos que possibilite a identificação de padrões, que podem ser correlacionados com a litologia onde os dados estão localizados (Isaaks; Srivastava, 1989).

6.7 Geofísica: métodos e aplicações

A geofísica integra a maior parte dos programas de exploração mineral mundiais, sendo utilizada pela facilidade de mapear grandes áreas de maneira rápida, minimizando a quantidade de perfurações necessárias, e consequentemente diminuindo o custo do processo de exploração, ajudando a identificar feições sutis não observadas em trabalhos de campo, por exemplo. Para identificação dos diferentes ambientes geológicos, a geofísica faz a leitura das propriedades físicas do ambiente de estudo (Dentith; Mudge, 2014).

Segundo Dentith e Mudge (2014) os métodos geofísicos podem ser divididos em cinco classes, de acordo com a respostas das propriedades físicas, são elas: Método gravitacional e magnético, focados na densidade e resposta magnética da área estudada; o método radiométrico com enfoque na detecção das variações da radioatividade dos isótopos de radioelementos tório (Th), potássio (K) e urânio (U); Método sísmico, diz respeito a propriedade elástica das rochas, e os métodos elétricos baseados nas propriedades elétricas das rochas como condutividade elétrica ou resistividade elétrica. A aquisição destes dados pode ser realizada de forma aérea ou terrestre, a depender da fase do projeto, do tipo de alvo e o objetivo a ser alcançado, no que diz respeito ao nível de detalhe (Dentith; Mudge, 2014).

Estes métodos podem ser passivos ou ativos, os passivos utilizam as fontes naturais para detecção das propriedades físicas, como o campo magnético terrestre, a gravidade e a radioatividade dos isótopos de K, Th e U. Já os métodos ativos

baseiam-se na aplicação de alguma forma de corrente no solo, como ondas sísmicas ou elétricas (Dentith; Mudge, 2014).

6.7.1 Geofísica na identificação de ETRs

A formação da crosta terrestre corresponde ao principal fator de transporte dos elementos enriquecidos em urânio, tório e potássio, podendo ocorrer por meio de processos metamórficos, fusão crustal, metassomatismo e também em migração de fluídos. Rochas de composição quartzosa e plagioclásio apresentam baixas concentrações de U, Th e K, enquanto rochas compostas por micas, feldspatos potássicos e minerais acessórios como o zircão, a apatita e a monazita contêm uma concentração maior destes elementos (Sapucaia, 2004). Segundo Rudnick e Gao (2003) as concentrações médias destes três elementos na crosta são: o potássio apresenta cerca de 2,32%, o urânio 2,7 ppm e o tório 10 ppm.

Segundo Dickson e Scott (1997) U, Th e K mostram um aumento de seus teores quanto maior for o teor de sílica das rochas ígneas. Estes elementos estão contidos principalmente em minerais acessórios, em defeitos estruturais de determinados minerais e até mesmo entre seus grãos. Tendo isto em vista, as concentrações destes minerais ricos em radioelementos são maiores em granitos, pois no momento em que ocorre a fusão parcial da rocha geradora, pode haver uma maior quantidade de radionuclídeos que são transportados pelo magma e se depositam durante o seu resfriamento (Rocha, 2012), bem como em pegmatitos, carbonatitos ou em rochas que sofreram alterações potássicas (Shives; Charnbonnea; Ford, 2000; Shah *et al.*, 2021).

No caso dos elementos terras raras, existe uma correlação visível em diferentes trabalhos, do Th equivalente (eTh) com a presença de elementos terras raras e também do potássio. Isto ocorre devido à presença destes elementos em minerais que possuem ETRs em sua composição, como é o caso da monazita e do tório, da ocorrência de zircão nas rochas, mineral que apresenta tório em sua estrutura e pela relação de fluidos ricos em potássio que acabam concentrando ETRs (Sapucaia, 2004; Shat *et al.*, 2021; Shives; Charnbonnea; Ford, 2000; Rocha, 2012).

Estes radioelementos se dão pelo decaimento dos isótopos radioativos devido à alta instabilidade dos mesmos no seu núcleo atômico, liberando energia pelas

partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ), onde as partículas gama podem ser detectadas pelo método radiométrico (Kearey; Brooks; Hill, 2009).

A magnetometria também pode ser um método importante para identificação de elementos terras raras. É normal que estes elementos não apresentem magnetismo ou sejam fracamente magnéticos, porém, as rochas hospedeiras intrusivas podem gerar assinaturas magnéticas que podem identificar na identificação de possíveis concentrações de ETRs (Thomas, Ford e Keating, 2015).

6.8 Estado da arte

Com o crescente aumento do uso dos elementos terras raras na indústria, começou-se a estudar os efeitos das concentrações destes elementos, não só em rochas, como em plantas, visando entender como ocorre a absorção destes elementos no sistema das plantas, a correlação com o solo e conseqüentemente com o tipo de litologia formadora do solo e os efeitos destes elementos nas plantas e para o ser humano (Tao *et al.*, 2022). Há uma concentração maior destes estudos na China, devido ao uso extensivo de rochas que possuem altas concentrações de elementos terras raras, como corretores de solo.

Pesquisas como as de Tao *et al.* (2022), Yang *et al.* (1999) e Zhang *et al.* (2002), dão ênfase ao impacto dos ETR em plantas, sua distribuição, fracionamento dos elementos e sua biodisponibilidade. De maneira semelhante Cunha; Nardi e Formoso (2010) e Cunha; Nardi e Muller (2011) realizaram um comparativo entre as absorções e fracionamentos dos ETR em plantas e rochas presentes no mesmo contexto geológico.

O livro de Lapido-Loureiro (2013) apresenta a importância dos elementos terras raras, a evolução destes elementos na economia, as perspectivas na indústria e os tipos de depósitos em que ocorrem as mineralizações, no Brasil e no mundo. Segundo o autor, as mineralizações são habitualmente encontradas em complexos intrusivos alcalinos ou peralcalinos, onde se encontram granitos, sienitos, carbonatitos e em depósitos do tipo *p/acer*, condizente com o que também afirmam Takehara *et al.* (2015).

No capítulo II do livro de Lapido-Loureiro (2013), são apresentadas importantes ocorrências de elementos terras raras associadas a rochas graníticas alcalinas no Brasil, como a jazida de Pitinga (AM), onde são explorados estanho (Sn), Nióbio (Nb),

Tântalo (Ta) e como subprodutos lantanídeos e Ítrio (Y) de um *placer* fluvial originado dos corpos graníticos Água Boa e Madeira.

Em relação à quantificação de elementos terras raras, o trabalho de Oliveira (2017) utilizou análises estatística caracterizando e descrevendo as distribuições dos dados, a fim de analisar o comportamento das variáveis de interesse e gerar um modelo de distribuição espacial de teores por meio de Krigagem Ordinária, no depósito de elementos terras raras "Área Zero", no município de Araxá, Minas Gerais.

O trabalho de Maturana Filho (2015) realizou uma caracterização das concentrações de elementos terras raras nas regiões de Lavras do Sul, Caçapava do Sul e Vila Nova do Sul, onde foi construído um banco de dados com 166 amostras contendo geoquímica de elementos maiores (óxidos) e elementos traço, dentre eles, os elementos terras raras. Com uso da estatística uni e bivariada, realizada entre os 16 elementos terras raras e os elementos maiores, foi possível notar uma correlação positiva entre alguns elementos e a sílica, com isso, o banco de dados foi dividido com os domínios variando de acordo com a quantidade de sílica. Maturana Filho (2015) usou três diferentes interpoladores clássicos para a estimativa dos teores dos ETRs e usou a validação cruzada para determinar o melhor método a ser utilizado.

Maturana Filho (2015) concluiu que os teores dos dois domínios de rochas, ácidas, intermediárias e básicas, possuem um teor muito inferior em relação aos depósitos economicamente viáveis existentes.

Barreiro (2017) em seu trabalho, propôs analisar o comportamento de distribuição dos elementos terras raras em rochas e plantas do CILS, concluindo que nas rochas os ETRs se encontram no padrão tétrade tipo M, devido anomalias negativas de Nd, Gd, Ho-HR, com exceção do sienogranito, que possui padrão tipo W. Já para carqueja, concluiu que o padrão predominante é o tipo W, devido a processos exógenos, que acabam concentrando os elementos no sistema de raízes das planta.

Trabalhos ao redor do mundo trazem o uso de geofísica para identificação de elementos terras raras. Thomas, Ford e Keating (2015), apresentam diferentes três métodos geofísicos, gravimetria, magnetometria e gamaespectometria, afim de demonstrar a eficiência desses métodos em trabalhos já realizados. Citam como um exemplo de sucesso do método da gamaespectometria o trabalho de Ford, Dilabio e Rencz (1998), que identificou uma anomalia de eTh em meio ao carbonatito de Allan Wake em ambiente glacial, definindo-o como um alvo de exploração mineral.

Em relação aos granitos pode-se citar o trabalho de Costa e Oliveira (2012) que utilizou a gamaespectrometria para identificar o zoneamento e o potencial mineral de ETRs do granito de Acari, no Rio Grande do Norte, Brasil. Neste trabalho os autores utilizaram-se de dados aerogamaespectrométricos onde identificaram que as anomalias de potássio dentro do domínio do granito constituem o corpo como um todo, o que já era esperado tendo em vista a composição félsica da rocha, devido a minerais como feldspato potássico e biotita. As anomalias de Urânio apresentaram alguns valores mais altos que a média crustal. Já o tório chegou a apresentar anomalias de 70 ppm, estando presente apenas no batólito. Os autores concluíram que esta maior quantidade de tório, tem relação com a petrografia da área, onde os granitoides apresentam em sua composição, uma maior quantidade de monazita e zircão, em relação as rochas ao redor do batólito, sendo assim, uma área potencial de exploração.

Em relação a magnetometria pode-se citar os trabalhos de Jambor e Sinclair (1990) que por meio de aeromagnetometria identificaram uma intrusão alcalina rica em terras raras, devido a identificação de uma anomalia circular, marcada por um alto magnético. Outro estudo semelhante é o de Satterly (1970) que identificou inúmeras assinaturas magnéticas no complexo carbonatítico alcalino em Ontário, no Canadá em formas ovais, circulares e elípticas, onde nas bordas destas formas, estavam a maior presença de ETRs.

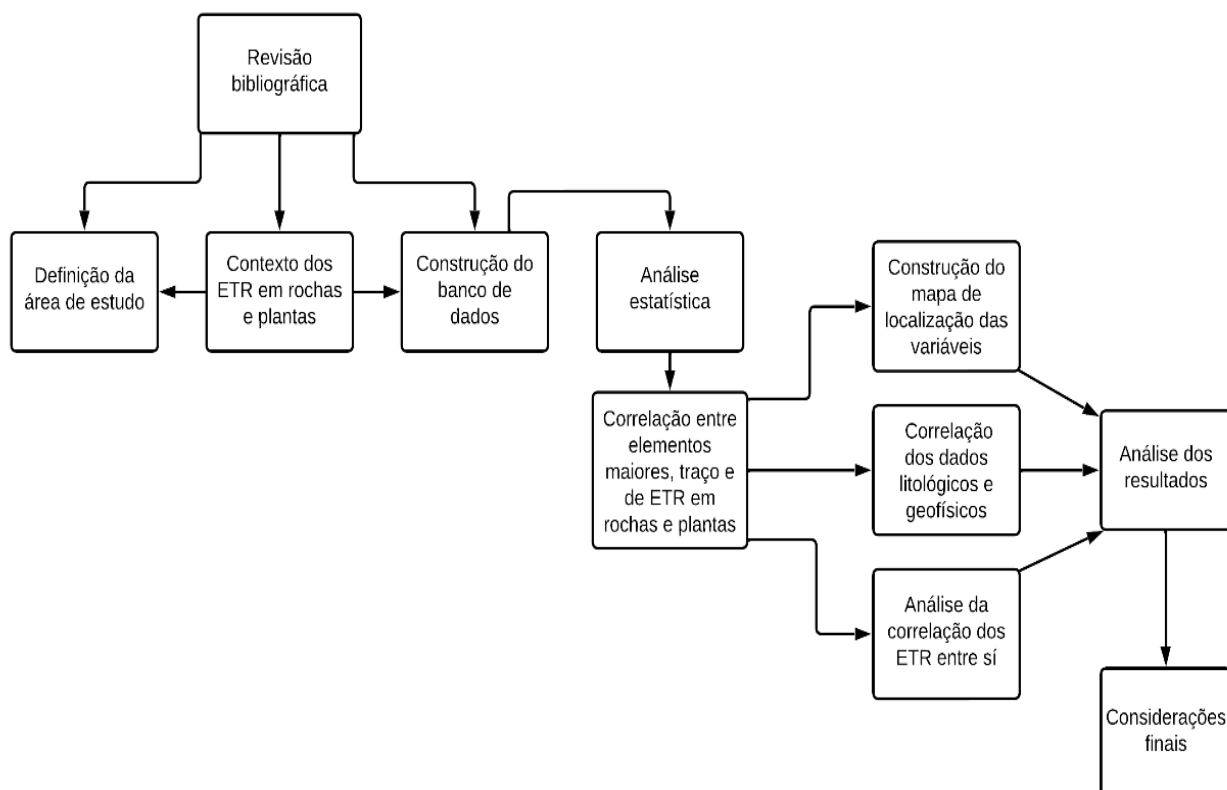
7 MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Revisão bibliográfica

Com intuito de realizar a análise de correlação e entender a distribuição dos ETRs em rochas e plantas em diferentes litologias da região de Lavras do Sul, a revisão bibliográfica esteve presente em todas as etapas do trabalho, tendo como principais tópicos a compreensão dos ETR em rochas e plantas, a construção do banco de dados a partir de dados de geoquímica total de trabalhos anteriores e a análise estatística dos dados com o uso de *softwares* específicos.

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma exemplificando as etapas a serem realizadas quanto aos materiais e métodos.

Figura 5 - Fluxograma exemplificando etapas dos materiais e métodos.



Fonte: Autor

7.2 Análise estatística

7.2.1 Tratamento dos dados e sumário estatístico

Nesta etapa foi realizado o tratamento do banco de dados, a fim de identificar valores extremos e *outliers*. Além disso, com uso dos *softwares* livres GSLIB e SGeMs foram realizados os histogramas de frequência das variáveis, onde a partir do sumário estatístico gerado, foram construídas tabelas com os dados das variáveis, com o objetivo de analisar as medidas de tendência central, medidas de localização e medidas de espalhamento.

7.2.2 Correlação

A partir dos dados geoquímicos de elementos maiores, elementos menores e elementos traço de rocha e planta, foi realizada matrizes de correlação a fim de identificar a correlação dos elementos maiores e traço com os ETRs e a correlação dos elementos entre si.

7.2.3 Análise geofísica

Nesta etapa foram gerados os mapas geofísicos de magnetometria e gamaespectrometria da área de estudo, com os dados do Serviço Brasileiro de Geologia, disponíveis de forma aberta ao público (Serviço Brasileiro de Geologia – SBG, 2010). Estes mapas foram gerados a partir do *software* gratuito QGIS e visam auxiliar na identificação de tendências que ajudem a explicar a distribuição dos ETRs ao longo da área de estudo, nas diferentes litologias.

7.2.4 Comparação dos resultados e análise espacial

Ao realizar a análise uni e bivariada, os mapas de localização das variáveis e os mapas geofísicos, estes dados foram comparados a fim de buscar uma possível correlação entre as concentrações destes elementos e identificar como as variáveis estão dispostas, procurando correlacionar com a litologia do CILS.

8. Resultados e discussões

8.1 Banco de dados

O banco de dados possui um total de 14 amostras, sendo 7 amostras de rochas e 7 amostras de plantas, estando localizadas no Complexo intrusivo Lavras do Sul, todas possuindo análises geoquímicas de elementos maiores, menores e traços. Para realização da análise uni e bivariada, foram escolhidos os elementos maiores: dióxido de silício (SiO_2), escolhido por ter maior abundância no banco de dados, o dióxido de titânio (TiO_2) escolhido por conta de a titanita possuir em sua estrutura elementos terras raras (Gastal *et al.*, 2006) e óxido de potássio (K_2O).

O tório (Th), elemento traço, também foi escolhido para realização da análise estatística por estar presente na fórmula química da monazita, mineral de elementos terras raras (Takehara *et al.*, 2015), e também por ser um dos três elementos, juntamente com urânio e potássio, que compõe o método radiométrico da gamaespectrometria. (Dentith; Mudge, 2014)

Já os elementos terras raras escolhidos foram o lantânio (La), cério (Ce), neodímio (Nd), ítrio (Y) e gadolínio (Gd) por serem os ETR's mais abundantes no banco de dados e também por formarem os efeitos tétrades tipo M e W, presentes nas plantas.

8.2 Estatística univariada

Nesta seção, será apresentada a estatística univariada das variáveis de interesse: SiO₂, TiO₂, K₂O, Th, La, Ce, Nd, Gd e Y. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas algumas medidas descritivas como média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos, quartil superior e inferior e distância interquartil das variáveis de interesse, assim como a identificação de outliers e valores extremos.

Em relação aos elementos maiores analisados (tabela 1), nota-se que as medidas de espalhamento, desvio padrão e distância interquartil (IQR), sejam em rochas ou em plantas, se apresentam em valores baixos, mostrando uma dispersão baixa dos dados. Analisando os valores máximos e mínimos conclui-se que o dióxido de silício nas rochas (SiO_{2r}), o óxido de potássio nas rochas (K₂Or) e óxido de potássio nas plantas (K₂Op) possuem *outliers*, ou seja, valores erráticos que pertencem ao banco de dados. Enquanto o dióxido de silício nas plantas (SiO_{2P}) e o óxido de ferro nas plantas (Fe₂O₃) apresentam valores extremos, ou seja, valores anômalos elevados (ANEXO B). Estes valores extremos estão associados a amostra de número 2, um granodiorito, que destoa dos valores encontrados nos mesmos elementos nas plantas presentes na mesma litologia. Não foi encontrada nenhuma resposta nas bibliografias estudadas que identificassem o porquê desta anomalia apenas nesta amostra.

No tório nota-se um desvio padrão elevado, devido à grande diferença entre os valores máximos e mínimos das variáveis, além disso, como pode ser visto na tabela 1, o tório presente na rocha (Thr) apresenta um valor extremo, que pertence a amostra

12, representada pelo sienogranito, onde são encontradas as maiores concentrações de ETRs do banco de dados.

Tabela 1 – Medidas descritivas dos elementos maiores e elementos traço

%	SiO ₂ r	SiO ₂ p	K ₂ Or	K ₂ Op	TiO ₂ r	TiO ₂ p	Fe ₃ O ₂ r	Fe ₃ O ₂ p	ppm	Thr	Thp
Média	70,94	2,63	3,85	1,73	0,28	0,01	2,30	0,06		11,68	5,75
Mediana	70,58	2,24	3,66	1,76	0,28	0,01	2,27	0,05		10,60	5,40
Desvio Padrão	1,65	1,51	0,54	0,26	0,02	0,01	0,27	0,04		4,35	3,78
Coefficiente de Variação	0,02	0,57	0,14	0,15	0,08	0,63	0,12	0,62		0,37	0,66
Valor Máximo	74,41	6,17	4,97	2,20	0,32	0,02	2,64	0,14		22,2	11,10
Valor Mínimo	69,22	1,58	3,26	1,38	0,25	0,00	1,79	0,02		9,00	0,80
Q3	70,96	2,36	3,94	1,83	0,29	0,01	2,50	0,05		10,70	6,30
Q1	69,63	1,58	3,42	1,52	0,26	0,01	2,16	0,04		9,10	1,80
IQR	1,33	0,78	0,52	0,31	0,03	0,001	0,34	0,01		1,60	4,50
Outlier: Q3 +(1.5*H)	72,955	3,53	4,72	2,30	0,34	0,01	3,01	0,07		13,10	13,05
Outlier: Q1 - (1.5*H)	67,635	0,41	2,64	1,06	0,22	0,005	1,65	0,03		6,70	-4,95
Valores extremos: Q3+(3*H)	74,95	4,70	5,50	2,76	0,38	0,01	3,52	0,08		15,50	19,80
Valores extremos: Q1 -(3*H)	65,64	-0,76	1,86	0,59	0,17	0,003	1,14	0,01		4,30	-11,70

Fonte: Autor

Ao analisar a Tabela 2, percebe-se inicialmente que os elementos terras raras La, Ce, Nd, Gd e Y, presentes nas rochas e nas plantas apresentam valores de média altos, isso se deve pela média ser sensível a valores muito altos ou muito baixos, neste caso pode-se observar no (ANEXO A) que algumas amostras apresentam valores consideravelmente altos destes elementos, como por exemplo a amostra 12 de rocha (sienogranito) que apresenta os maiores valores de lantânio e cério em comparação as outras amostras.

Isto também influencia no desvio padrão destes elementos, que se apresenta alto nas variáveis citadas devido à alta dispersão dos dados. Baseando-se nestes dados é possível notar que esta alta variação dos dados pode ser controlada pela litologia, onde a amostra de sienogranito é a que apresenta as maiores concentrações dos elementos terras raras analisados, podendo ser correlacionado com a afirmativa de Anenburg *et al.* (2020) que rochas mais alcalinas concentram mais ETRs.

Algumas variáveis apresentaram outliers e valores extremos, que podem ser vistos no anexo B. Esses valores mais altos não devem ser descartados e podem ser vistos como anomalias positivas, que ajudam a entender o comportamento dos ETRs em diferentes litologias, e delimitam o sienogranito como o maior concentrador de elementos terras raras nas rochas.

Uma das justificativas para a ocorrência destes valores extremos de ETRs está ligada a quantidade de amostras, onde tem-se apenas uma amostra de sienogranito e uma de monzogranito, que concentram o maior número de ETRs em rochas e

plantas, respectivamente, devido as maiores concentrações de potássio e tório nos sienogranitos e de óxido de ferro no monzogranito.

Tabela 2 - Medidas descritivas dos elementos terras raras

(ppm)	Lar	Lap	Cer	Cep	Ndr	Ndp	Gdr	Gdp	Yr	Yp
Média	33,33	42,80	58,87	48,88	25,70	28,57	3,93	4,24	16,28	19,00
Mediana	26,30	23,20	47,20	38,10	19,20	14,50	2,80	1,80	11,00	8,00
Desvio Padrão	14,95	44,95	29,51	43,17	15,52	31,36	3,19	5,04	12,62	21,44
Coefficiente de Variação	0,45	1,05	0,50	0,88	0,60	1,10	0,81	1,19	0,78	1,13
Valor Máximo	62,80	130,00	129,00	135,00	62,40	86,40	11,70	13,60	47,00	56,00
Valor Mínimo	15,10	4,00	38,10	6,40	13,00	2,30	2,10	0,30	9,00	2,00
Q3	36,10	35,70	49,70	47,30	24,20	19,30	2,90	2,00	12,00	10,00
Q1	23,70	5,70	41,30	11,00	16,40	2,90	2,30	0,40	11,00	2,00
IQR	12,40	30,00	8,40	36,30	7,80	16,40	0,60	1,60	1,00	8,00
Outlier: Q3 +(1.5*H)	54,70	80,70	62,30	101,75	35,90	43,90	3,80	4,40	13,50	22,00
Outlier: Q1 - (1.5*H)	5,10	-39,30	28,70	-43,45	4,70	-21,70	1,40	-2,00	9,50	-10,00
Valores extremos: Q3+(3*H)	73,30	125,70	74,90	156,20	47,60	68,50	4,70	6,80	15,00	34,00
Valores extremos: Q1 -(3*H)	-13,50	-84,30	16,10	-97,90	-7,00	-46,30	0,50	-4,40	8,00	-22,00

Fonte: Autor

8.3 Estatística bivariada

Nesta etapa foram realizadas matrizes de correlação entre os elementos maiores (óxidos), elementos traço e os elementos terras raras, tanto em rocha quanto em plantas e também matrizes de correlação dos elementos terras raras entre si. Primeiramente, foram realizadas as correlações entre os elementos maiores e os elementos terras raras nas rochas e nas plantas.

8.3.1 Análise da correlação entre elementos maiores e traço com ETRs nas rochas

Conforme a Tabela 3, nota-se que não houve nenhum tipo de correlação entre o dióxido de silício e os ETRs presentes na rocha, o que se diferencia de alguns trabalhos que encontraram correlação entre estes elementos, como no trabalho de Maturana Filho (2015). A partir disto, foi realizada a correlação entre o dióxido de titânio (TiO₂) e os ETRs, pois a titanita, mineral presente nos granitoides do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, possui em sua estrutura elementos terras raras (Gastal *et al.*, 2016) e não foi encontrada qualquer tipo de correlação, o que pode ser justificado pela baixa concentração de dióxido de titânio (TiO₂) e, pois, segundo Mexias (2000) a titanita, durante a intrusão alcalina sofreu influência de fluidos hidrotermais seus ETRs

sofreram alteração, sendo usados para formar a monazita hidrotermal presente no CILS.

Tabela 3 – Correlação entre os ETRs presentes nas rochas, os óxidos e elementos traço.

Elementos	SiO _{2r}	K ₂ Or	TiO _{2r}	Fe ₃ O _{2r}	Thr	Lar	Cer	Ndr	Gdr	Yr
SiO _{2r}	1	0,685	0,135							
K ₂ Or	0,685	1	-0,230							
TiO ₂	0,135	-0,23	1							
Fe ₃ O _{2r}	-0,700	-0,108	-0,029	1						
Thr	0,217	0,836	-0,187	0,398	1					
Lar	0,588	0,827	0,177	0,141	0,776	1				
Cer	0,143	0,762	-0,134	0,53	0,965	0,828	1			
Ndr	0,379	0,867	-0,06	0,328	0,949	0,928	0,967	1		
Gdr	0,265	0,85	-0,167	0,391	0,990	0,839	0,982	0,980	1	
Yr	0,234	0,833	-0,164	0,42	0,990	0,831	0,986	0,977	1	1

Fonte: Autor

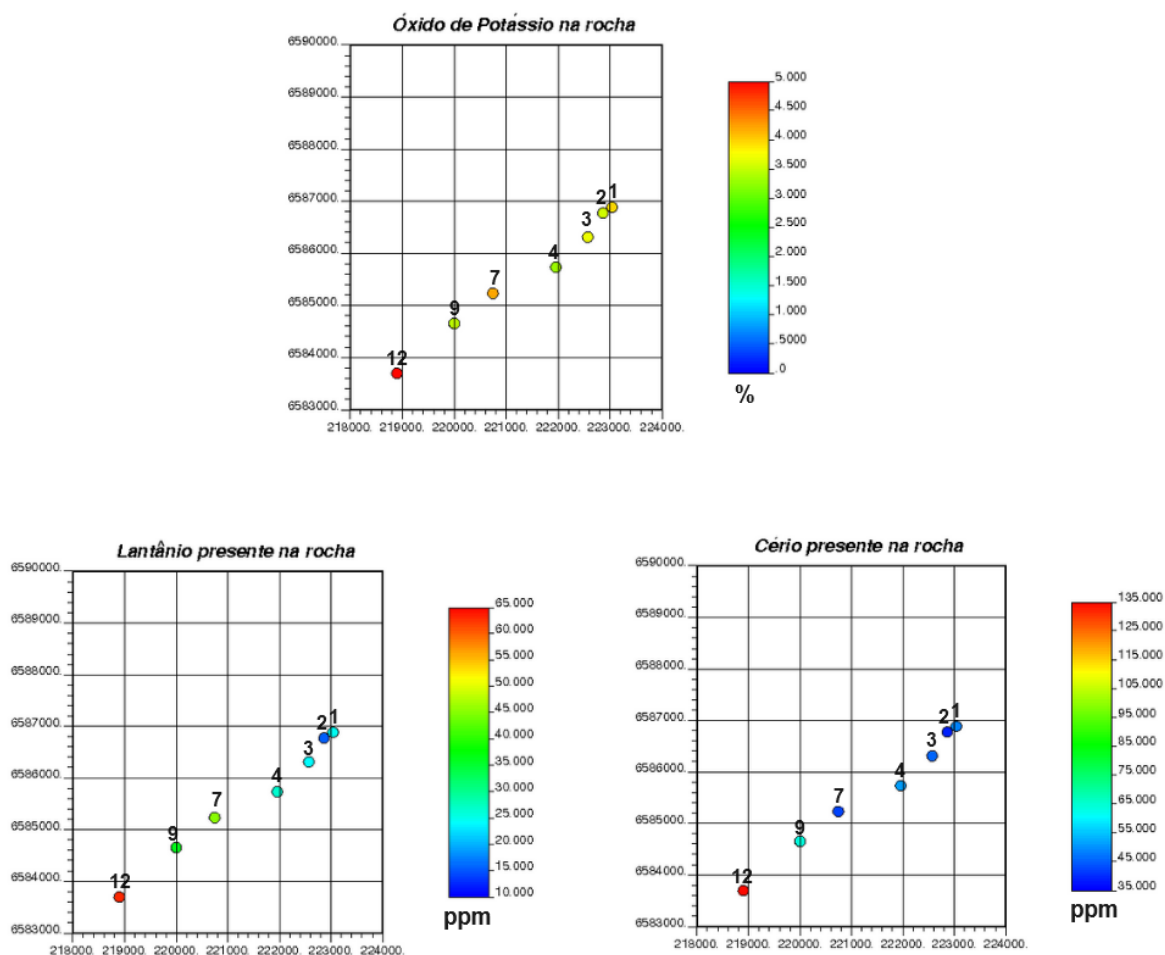
Já o óxido de potássio (K₂O) apresentou uma correlação positiva alta com os elementos terras raras. Este comportamento ocorre, pois segundo Anenburg *et al.*, (2020) os ETRs possuem alta afinidade química com álcalis e são mobilizados por fluidos alcalinos. Segundo Gastal *et. al.*, (2016) as rochas do CILS possuem uma quantidade significativa de minerais alcalinos, pois sofreram influência de fluidos alcalinos durante sua formação, principalmente o sienogranito, rico em k-feldspato e com maior presença de elementos terras raras como cério e lantânio e também de óxido de potássio (K₂O).

Esta correlação positiva pode ser observada na figura 6, onde as amostras de número 12, 9 e 7 são as que apresentam a maior concentração de óxido de potássio (K₂O) e isto representa uma maior concentração dos elementos terras raras, como cério e lantânio, nas rochas.

Em relação ao tório (Th) presente nas rochas, houve uma correlação positiva alta entre este elemento e os elementos terras raras presentes nas rochas, esta correlação pode ser notada espacialmente na figura 7, onde estão os mapas de localização do tório, cério e lantânio. A correlação pode ser explicada devido ao tório ser um radioelemento litófilo, tendo maior afinidade com rochas ígneas ácidas. Além disto o tório está presente nas fórmulas químicas de monazitas e apatitas, que são minerais presentes no CILS, principalmente nas rochas mais alcalinas, pertita granito

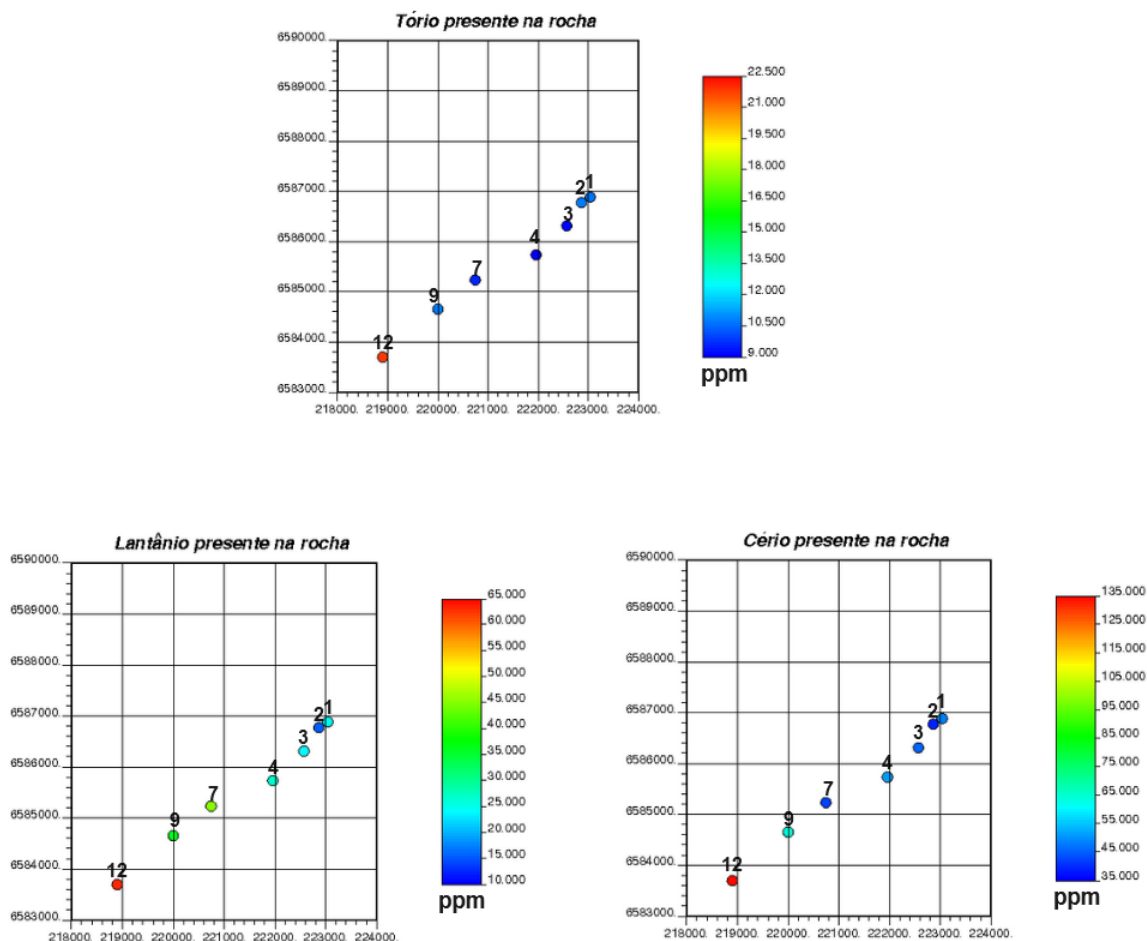
e sienogranito, justificando assim esta correlação (Gastal; Lafon, 1998; Sapucaia, 2004 Chaves, 2012). Este assunto será melhor abordado no tópico 8.4 de correlação dos dados geológicos e geofísicos.

Figura 6 - Mapa de localização do óxido de potássio, cério e lantânio.



Fonte: Autor

Figura 7 - Mapa de localização do tório, cério e lantânio.



Fonte: Autor

8.3.2 Análise da correlação entre elementos maiores e traço com ETRs nas plantas

Na tabela 4 tem-se o resultado da correlação entre os elementos maiores e os ETRs presentes nas plantas. Nota-se que, assim como nas rochas, não há nenhuma correlação entre os dióxidos de silício (SiO_2) e de titânio (TiO_2) com os ETRs nas plantas. Já o óxido de potássio (K_2O) apresentou uma correlação negativa com os elementos terras raras, indicando que quanto maior a presença deste óxido, menor será a quantidade de ETRs nas plantas, comportamento oposto ao que ocorre nas rochas.

Este resultado não era esperado, uma vez que, segundo Wang *et al.* (2013), o potássio é um nutriente essencial para as plantas, contribuindo para seu

desenvolvimento e sobrevivência. Amaral *et al.* (2010), indica que mesmo em solos pobres em potássio a carqueja é capaz de crescer, mas ressalta a importância deste elemento, mesmo que não demande taxas altas do elemento. Uma hipótese é que, levando em consideração que estes elementos foram analisados a partir da planta como um todo, e não de áreas específicas, como raiz, caule e folhas, isto pode ter contribuído para o resultado de correlação negativa, contudo mais estudos são necessários.

Segundo Kovarikova, Tomaskova e Soudek (2019) a correlação entre sílica e ETRs presentes em plantas é esperada devido os processos de substituição da sílica no solo e aos ETRs serem muito estáveis como elementos litófilos ligados a rochas silicáticas. Por outro lado, Fu *et al.* (2001) destaca que essa correlação ocorre de maneira restrita, podendo haver em determinadas plantas e em outras não. Como nenhum destes trabalhos analisou a carqueja, a constatação de Fu *et al.* (2001), pode ser uma possível explicação para este comportamento.

Pode-se notar também a presença de correlação positiva entre o óxido de ferro (Fe_2O_3) presente nas rochas com os elementos terras raras presentes nas plantas. Este comportamento foi observado no trabalho de Brioschi *et al.* (2013) que comparou estudou os ETRs em plantas e correlacionou a presença dos mesmo nos solos e nas rochas da área estudada, onde o ferro, importante elemento para as plantas, ajuda a distribuir os elementos terras raras no solo, e conseqüentemente estes elementos são adsorvidos pelas raízes das plantas.

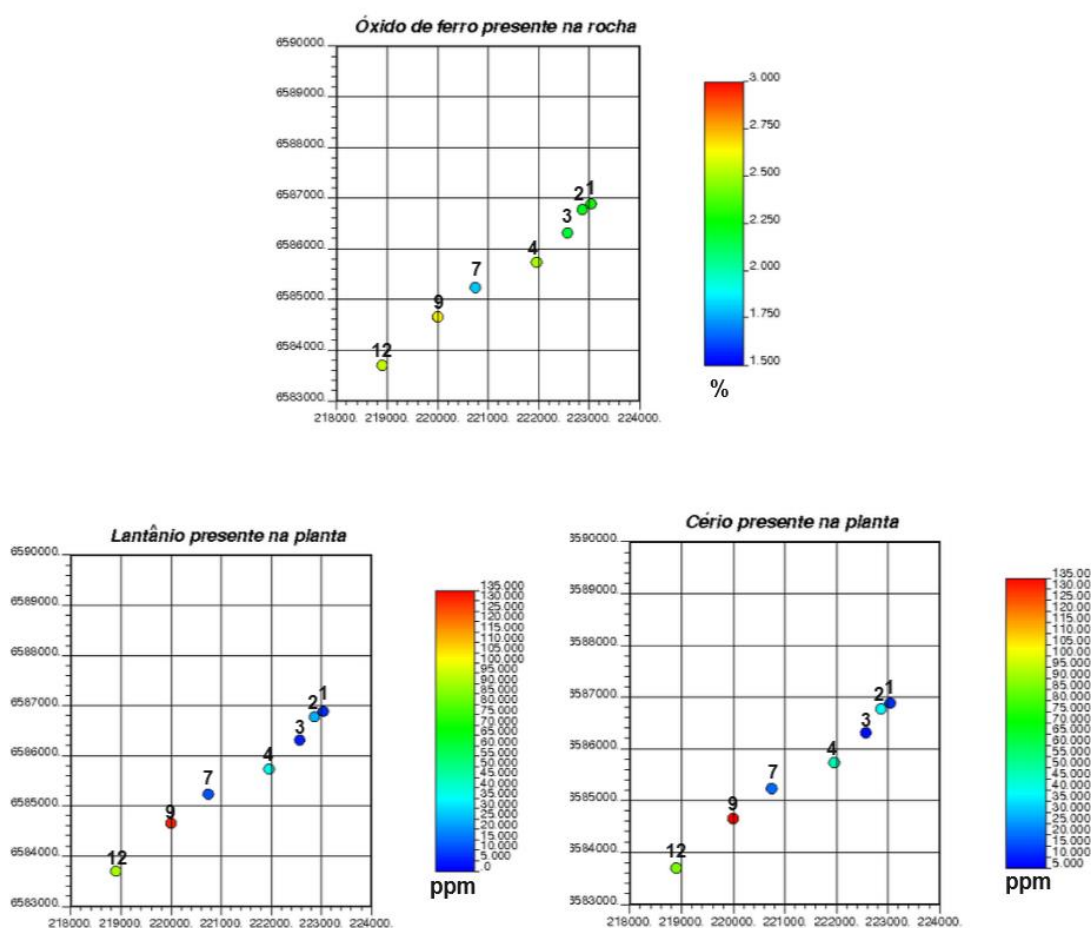
Tabela 4 - Correlação entre os ETRs presentes nas plantas e os óxidos

Elementos	SiO ₂ p	K ₂ Op	TiO ₂ p	Fe ₃ O ₂ r	Fe ₃ O ₂ p	Thr	Thp	Lap	Cep	Ndp	Gdp	Yp
SiO ₂ p	1											
K ₂ Op	0,608	1										
TiO ₂ p	0,946	0,402	1									
Fe ₃ O ₂ r	-0,140	-0,230	0,118	1								
Fe ₃ O ₂ p	0,894	0,313	0,986	0,252	1							
Thr	-0,184	-0,266	-0,12	0,398	-0,02	1						
Thp	0,259	-0,569	0,411	-0,089	0,433	0,008	1					
Lap	-0,067	-0,644	0,225	0,759	0,364	0,484	0,465	1				
Cep	0,018	-0,596	0,318	0,757	0,451	0,406	0,554	0,992	1			
Ndp	-0,082	-0,651	0,198	0,737	0,337	0,551	0,505	0,995	0,979	1		
Gdp	-0,091	-0,664	0,182	0,711	0,318	0,561	0,506	0,989	0,967	0,997	1	
Yp	-0,119	-0,667	0,147	0,708	0,286	0,62	0,486	0,981	0,954	0,994	0,996	1

Fonte: Autor

Na figura 8, a correlação entre o óxido de ferro (Fe_2O_3) e os elementos terras raras, fica evidente uma vez que, as amostras de número 9 e 12 são as que possuem a maior quantidade de óxido de ferro (Fe_2O_3) e conseqüentemente são as que apresentam a maior quantidade de elementos terras raras como o cério e lantânio, comportamento já identificado por Brioschi *et al.* (2013), comprovando a importância do óxido de ferro na rocha para a bioacumulação de ETRs nas plantas.

Figura 8 - Mapa de localização do óxido de ferro, cério e lantânio.



Fonte: Autor

8.3.3 Análise da correlação dos ETRs entre si

Ao realizar as correlações dos elementos terras raras entre si, obteve-se o resultado esperado de acordo com a bibliografia, tanto os ETRs em rochas (tabela 5) quanto os ETRs em plantas (tabela 6) apresentaram correlações fortemente positivas, onde destaca-se a correlação entre Gd e Y, ambos terras raras pesados. Esta correlação fortemente positiva ocorre pois ambos são elementos com propriedades físico-químicas semelhantes, causando uma alta afinidade química entre eles (Chakhmouradian; Wall, 2012).

Tabela 5 – Correlação entre os ETRs presentes nas rochas

Elementos	Lar	Cer	Ndr	Gdr	Yr
Lar	1				
Cer	0,828	1			
Ndr	0,928	0,967	1		
Gdr	0,839	0,982	0,980	1	
Yr	0,831	0,986	0,977	0,999	1

Fonte: Autor

Tabela 6 - Correlação entre os ETRs presentes nas plantas

Elementos	Lap	Cep	Ndp	Gdp	Yp
Lap	1				
Cep	0,992	1			
Ndp	0,995	0,979	1		
Gdp	0,989	0,967	0,997	1	
Yp	0,981	0,954	0,994	0,996	1

Fonte: Autor

8.3.4 Correlação não linear dos dados

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos através da correlação de rank, para as variáveis que não obtiveram correlação linear com os elementos terras raras, são elas: dióxido de silício nas rochas e plantas, dióxido de titânio em rochas e plantas, dióxido de ferro em rochas e plantas e dióxido de potássio nas plantas.

Na tabela 7 podem ser vistas a correlação dos ETRs presentes nas rochas com os elementos maiores (óxidos). Obteve-se uma correlação positiva entre óxido de

ferro nas rochas (Fe_3O_2r) e os elementos cério, gadolínio e ítrio, possivelmente esta correlação ocorre devido as rochas mais alcalinas do CILS possuírem como uma de suas fontes de ETRs o mineral anfibólio (Mexias, 2000), um inossilicato que possui ferro em sua composição. Esta correlação entre ETRs e anfibólios também foi encontrada no trabalho de Remus, Hartmann e Formoso (1993) que estudaram os padrões de ETRs em rochas do Complexo Cambaizinho, em São Gabriel.

Tabela 7 – Correlação não linear entre os ETRs presentes nas rochas e óxidos.

Elementos	SiO_2r	TiO_2r	Fe_3O_2r	K_2Op	Lar	Cer	Ndr	Gdr	Yr
SiO_2r	1								
TiO_2r	-0,214	1							
Fe_3O_2r	-0,464	0,143	1						
K_2Op	-0,107	-0,607	0,143	1					
Lar	0,429	0,286	0,357	-0,821	1				
Cer	-0,357	-0,071	0,857	-0,536	0,643	1			
Ndr	0,429	0,286	0,357	-0,821	1	0,643	1		
Gdr	0,286	0,143	0,679	-0,571	0,786	0,750	0,786	1	
Yr	0,286	0,143	0,679	-0,500	0,786	0,750	0,786	1	1

Fonte: Autor

A correlação entre lantânio e neodímio nas rochas com dióxido de potássio nas plantas (K_2Op), possui um comportamento semelhante ao encontrado na correlação linear entre dióxido de potássio nas plantas e os ETRs presentes nas plantas, onde ocorre um comportamento contrário a bibliografia. Mais estudos são necessários.

Na tabela 8 são apresentados os resultados das correlações não lineares entre os óxidos e os ETRs presentes nas plantas. Obteve-se uma correlação positiva entre dióxido de ferro e ETRs nas plantas. Este comportamento é justificado pela afinidade química presente entre ferro e etrs encontrados nas raízes das plantas, como observado por Artinez *et al.* (2012).

Obteve-se também correlação entre dióxido de titânio e os ETRs cério, neodímio, gadolínio e ítrio. Este comportamento pode ser justificado pela presença de ETRs na composição da titanita, como o neodímio e ítrio (Gastal *et al.*, 2016), contudo mais estudos são necessários.

Tabela 8 - Correlação não linear entre os ETRs presentes nas plantas e óxidos.

Elementos	SiO ₂ p	TiO ₂ p	Fe ₃ O ₂ p	TiO ₂ r	Lap	Cep	Ndp	Gdp	Yp
SiO ₂ p	1								
K ₂ Op	-0,107	1							
Fe ₃ O ₂ p	-0,357	0,893	1						
TiO ₂ r	-0,214	0,786	0,679	1					
Lap	0,143	0,429	0,679	0,286	1				
Cep	0,321	0,464	0,786	0,607	0,893	1			
Ndp	0,321	0,464	0,786	0,607	0,893	1	1		
Gdp	0,321	0,464	0,786	0,607	0,893	1	1	1	
Yp	0,214	0,357	0,750	0,607	0,893	1	1	1	1

Fonte: Autor

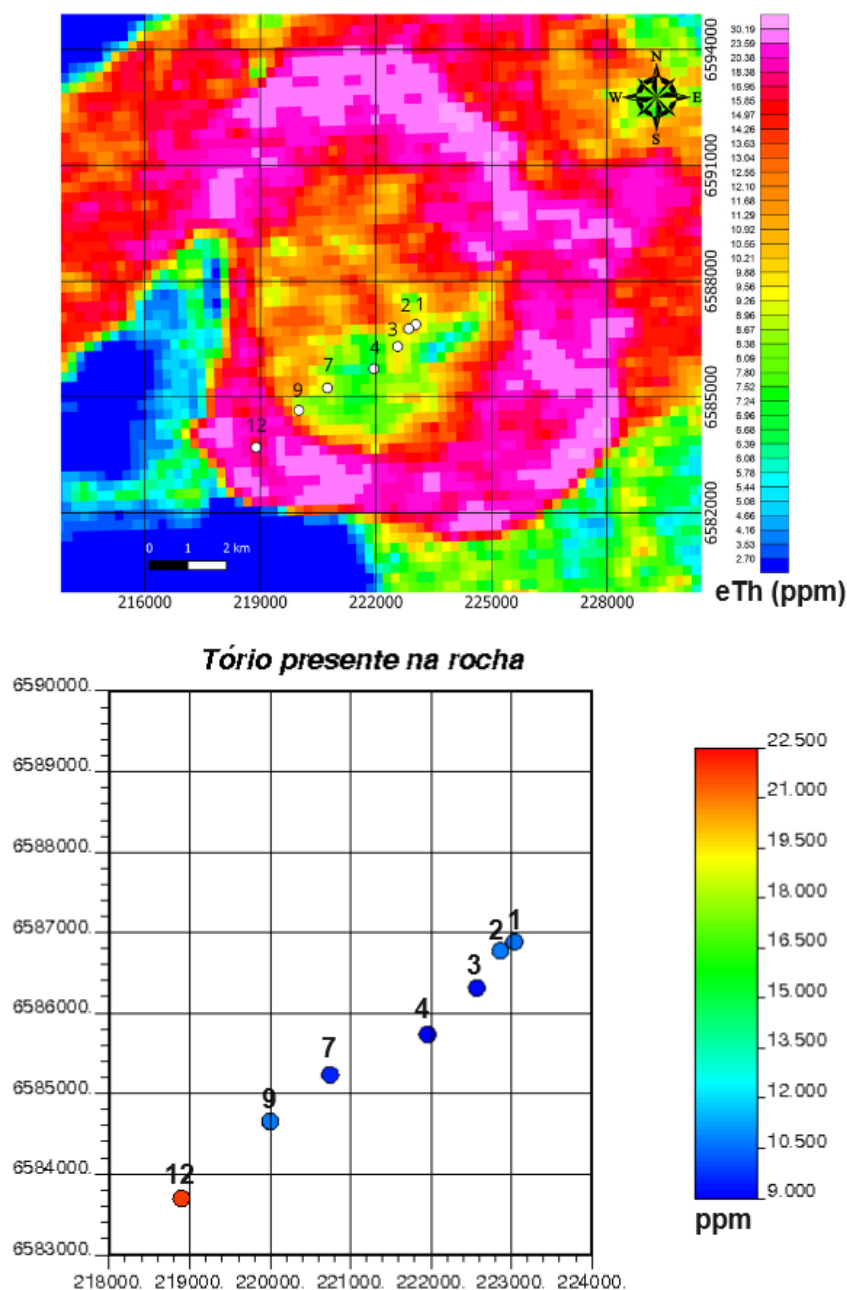
8.4. Correlação dos dados geológicos e geofísicos

Nesta etapa foi realizadas a construção de mapas geofísicos utilizando os dados disponíveis do Serviço Geológico do Brasil (SGB) (Serviço Brasileiro de Geologia – SBG, 2010), a fim de correlacioná-los com os dados geológicos e geoquímicos da área de estudo. Os dados do levantamento aerogeofísico tiveram linhas de voo com espaçamento entre linhas de 500 metros, orientadas nos sentidos N-S e E-W (CPRM, 2010). Para integração dos dados foram utilizados os levantamentos aeromagnetométricos e aerogamaespectométricos.

Levando em consideração os dados gamaespectométricos, foram feitos dois mapas para entender a relação dos elementos terras raras presentes na área de estudo com os radioelementos encontrados nas rochas potássio e tório, presentes em granitoides como os do CILS (Gastal *et al.*, 2006; Chaves, 2012).

Na figura 9, tem-se os mapas geofísicos do tório e o mapa de localização da variável no banco de dados e pode ser notado que o aumento do tório se dá principalmente na última amostra a SW. Essa concentração maior do tório pode estar ligada com a litologia da área, pois as bordas do CILS apresentam uma composição mais alcalina, devido a sua formação tardia em relação ao núcleo do complexo, representada por sienogranitos ricos em k-feldspatos, que possuem afinidade com os ETRs e pelos pertita granitos que possuem em sua composição monazitas hidrotermais, que possuem em sua composição o tório (Gastal; Lafon, 1998; Chaves, 2012).

Figura 9 - Comparação do tório na aerogeofísica com a distribuição do elemento no banco de dados.

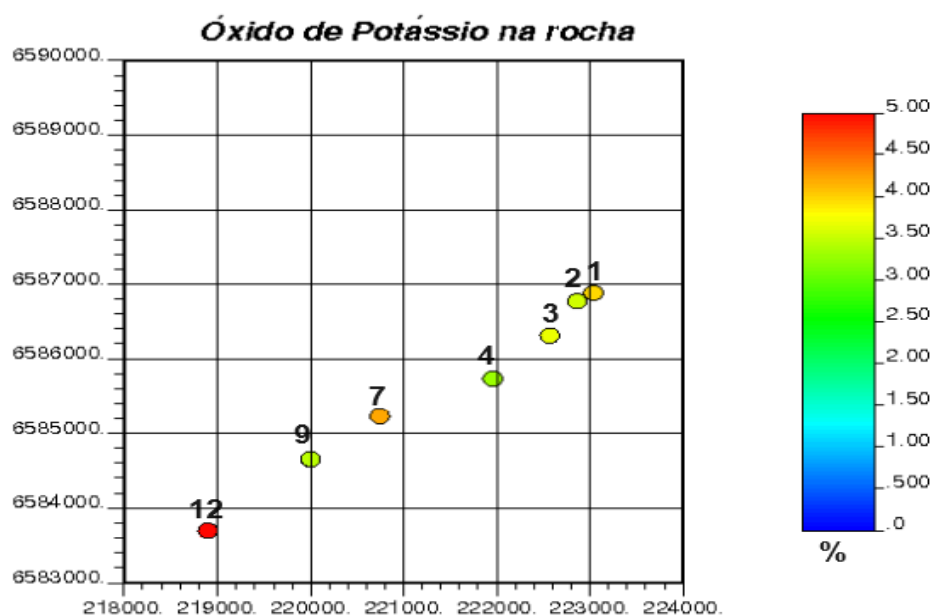
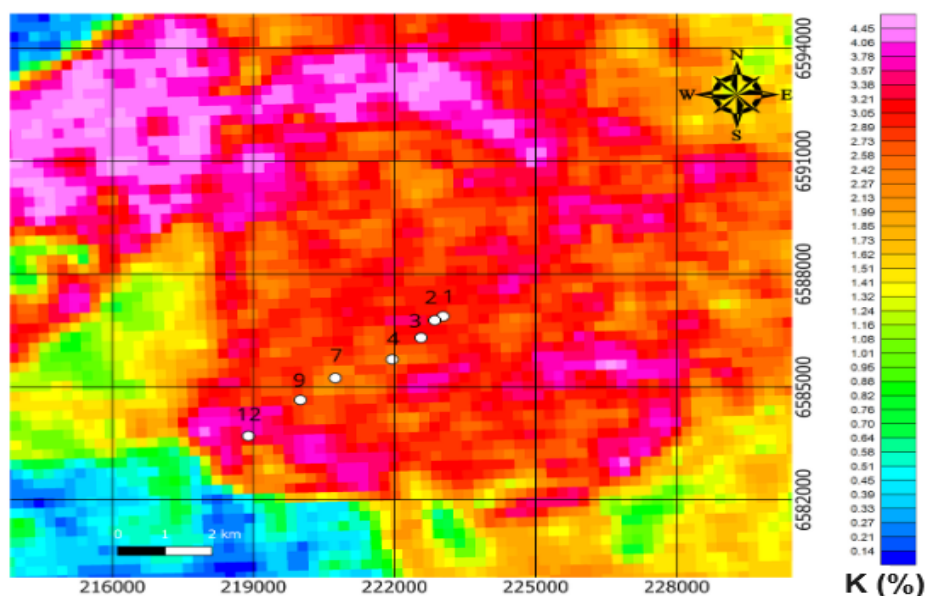


Fonte: Extraído e adaptado da CPRM, 2010.

Em relação ao potássio, ele é um o radioelemento mais frequente nas rochas sendo encontrado em granitóides devido à presença de alumino-silicatos como o feldspato potássico e nas micas (Sapucaia, 2004). Na figura 10 é possível notar uma distribuição mais homogênea do potássio ao longo das rochas da área de estudo, um comportamento esperado, se tratando de granitóides.

Mesmo assim, é possível notar que, assim como o tório, o potássio apresenta uma maior concentração na última amostra a SW, o sienogranito, isto ocorre pois, segundo Gastal *et al.* (2016) os sienogranitos do CILS possuem uma alta concentração de feldspato potássico, além da presença dos pertitas granitos, ricos em álcalis.

Figura 10 - Comparação do potássio na aerogeofísica com a distribuição do elemento no banco de dados.



Fonte: Extraído e adaptado da CPRM, 2010.

O mapa da magnetometria foi realizado a fim de entender a distribuição dos elementos terras raras nas plantas e a sua correlação positiva com o óxido de ferro

nas rochas (tabela 4), além de buscar identificar os padrões encontrados por Jambor e Sinclair (1998) e Sattery (1970) em relação a intrusões com presença de ETRs.

Como visto na figura 8, os elementos terras raras nas plantas possuem sua maior concentração na amostra de número 9. No mapa geofísico (figura 11), nota-se que esta amostra é a mais próxima da anomalia encontrada a sudeste, o que justificaria também a maior presença de ferro nas amostras 12 e 4.

Este comportamento envolvendo óxidos de ferro e a concentração de ETRs foi também observada nos trabalhos de Artinez *et al.* (2012), Brioschi *et al.* (2012) e Kovarikova, Tomaskiva e Soudek (2019), que estudaram as concentrações destes elementos em rochas, solos e plantas. Ocorre que o mecanismo utilizado pelo sistema de raízes das plantas para absorver o ferro e seus óxidos, nutriente essencial para as plantas, é o mesmo mecanismo usado para a absorção dos ETRs presentes no solo, logo o ferro funciona como um filtro de oligoelementos (Artinez *et al.*, 2012; Brioschi *et al.*, 2012).

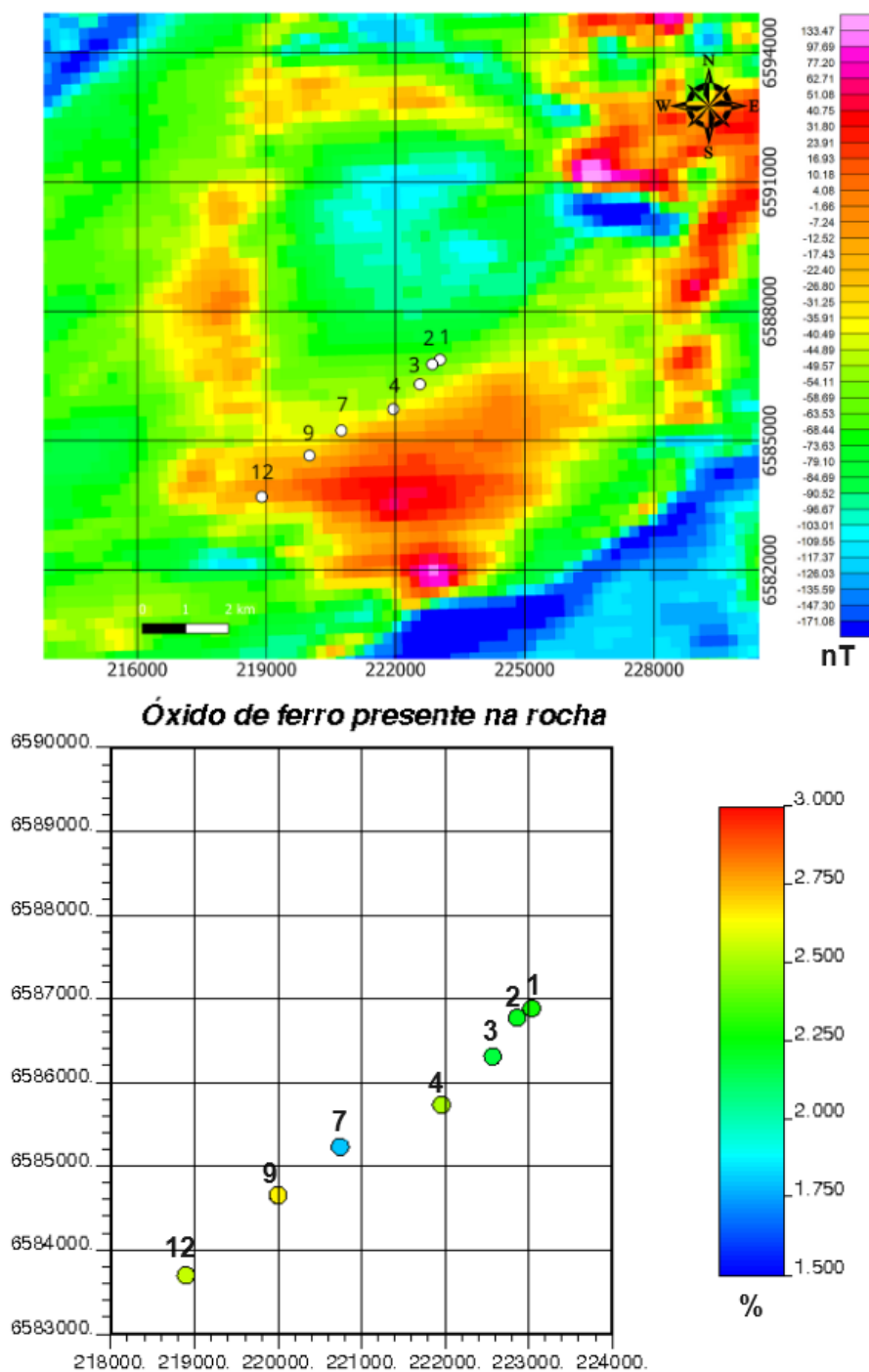
Em relação às concentrações de elementos terras raras nas plantas, há uma tendência de que as raízes das plantas concentrem uma maior quantidade de elementos terras raras leves em relação ao solo adjacente (Artinez *et al.*, 2012; Brioschi *et al.*, 2012), como ocorre nas amostras 4, 9 e 12, que concentram uma maior quantidade Ce, La e Nd (ANEXO C) nas plantas e de óxido de ferro nas rochas. Elementos terras raras pesados, como Gd e Y, Anexo C, também tendem a apresentar uma maior concentração onde ocorre uma maior concentração de óxido de ferro no solo (Artinez *et al.*, 2012).

As rochas graníticas segundo Brioschi *et al.* (2012) possuem uma relação indireta com as concentrações de ETRs nas plantas, isso se dá pois os principais parâmetros para a concentração destes elementos são a pedogenética e a mineralogia das fases transportadoras de ETRs entre rochas e solos. Em seu trabalho, Brioschi *et al.* (2012) identificou como fonte de ETRs nos granitos zircão e apatita, que foram transportados para o solo, por meios de processos exógenos e posteriormente absorvidos pelas plantas, preferencialmente em locais onde as rochas possuem uma maior concentração de óxidos de ferro.

No que diz respeito ao uso da magnetometria como uma ferramenta de exploração mineral para ETRs, o padrão observado por Jambor e Sinclair (1998) e Sattery (1970) se repete, onde tem-se uma intrusão que possui, no imageamento

geofísico, um formato circular e que tende a acumular uma maior quantidade de elementos terras raras em sua borda.

Figura 11 - Comparação da aeromagnetometria com a distribuição do óxido de ferro nas rochas.



Fonte: Extraído e adaptado da CPRM, 2010.

9. Considerações finais

Através da análise estatística de dados geoquímicos, interpretação geofísica e geológica da área de estudo, foi possível ampliar o conhecimento do comportamento dos elementos terras raras em rochas e plantas da região do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, compreendendo sua distribuição em diferentes litologias e a influência das mesmas na concentração destes elementos na carqueja.

Com a análise estatística dos dados foi possível identificar uma correlação positiva linear entre óxido de potássio e tório com os elementos terras raras presentes nas rochas. Isto se deve devido à alta afinidade química do potássio com os ETRs e com o tório, radioelemento litófilo, tendo ocorrência comum em rochas ácidas. Analisando os dados estatísticos, geológicos e geofísicos de gamaespectrometria, há uma tendência de concentração maior de ETRs nas rochas que apresentam mais potássio e tório, que aumenta de nordeste para sudoeste, quanto maior a proximidade da borda do CILS, que apresenta em sua litologia pertita granitos e sienogranitos, ricos em álcalis.

Em relação aos métodos geofísicos, a gamaespectrometria se mostrou assertiva na identificação de elementos terras raras, pois é justamente onde ocorre a maior concentração dos radioelementos tório e potássio, que se tem a maior concentração de ETRs. A magnetometria apresentou um resultado semelhante ao da bibliografia, onde a concentração de ETRs ocorrem em maior quantidade na borda da intrusão alcalina, porém, como tem-se apenas uma amostra de rocha na região de borda se faz necessário uma amostragem maior na área para que se tenha uma resposta mais evidente.

O comportamento dos ETRs encontrados nas plantas diferiu de algumas bibliografias que citavam a tendência de haver uma correlação linear entre dióxido de silício e estes elementos devido a sua ampla abundância no solo. Neste trabalho não foi encontrada nenhuma correlação linear entre os óxidos nas plantas com os ETRs presentes nas plantas, e sim com o dióxido de ferro presente nas rochas com os ETRs em plantas. Já com a correlação não linear foi encontrada uma correlação positiva entre dióxido de ferro e ETRs nas plantas, isto ocorre, pois, a forma com a qual o ferro é absorvido do solo pelo sistema de raízes das plantas, é parecida com a forma como

os ETRs são absorvidos, logo, o ferro acaba funcionando com um filtro destes elementos.

Levando em consideração que o solo é o produto de alteração das rochas, entende-se que a quantidade de elementos terras raras nas rochas possui uma correlação indireta com a concentração dos mesmos elementos nas plantas, pois esta concentração depende também dos processos pedogenéticos e dos tipos de minerais que estão concentrados no solo.

REFERÊNCIAS

AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; RADÜNZ, L. L.; TREICHEL, H.; TEIXEIRA, A. J.; LERIN, L. A.; ARGENTA, G. A. **Cultivo de carqueja (*Baccharis trimera*) em solução nutritiva com diferentes concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio.** Ver. Perspectv. 34, 25-34. 2010

ANENBUR, M *et al.* **Rare earth element mobility in and around carbonatites controlled by sodium, potassium, and silica.** *Sci*, V.6 , n. 41, out. 2020.
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abb6570>

ARTINEZ, R. E. *et al.* **Effect of rare earth elements on rice plant growth.** *Chemical Geology*, [S.L.], v. 489, p. 28-37, jun. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.012>.

BARREIRO, A. I. S. **Comportamento biogeoquímico de elementos traços com ênfase nas terras raras no sistema planta-rocha – Lavras do Sul/RS.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017. Disponível em:
<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/2126>. Acesso em: 20 set. 2023.

BATISTA, M.A. *et al.* **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral.** In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 113-162. ISBN: 978-65-86383-01-0. <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0006>

BAUER, L. **Estimação do coeficiente de correlação de spearman ponderado.** Dissertação (Mestrado em Medicina: Epidemiologia) – Programa de pós-graduação em medicina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BRIGGS, I. C. **MACHINE CONTOURING USING MINIMUM CURVATURE.** *Geophysics*, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 39-48, fev. 1974. Society of Exploration Geophysicists. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440410>.

BRIOSCHI, L. *et al.* **Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of anthropogenic ree.** *Plant And Soil*, [S.L.], v. 366, n. 1-2, p. 143-163, 23 ago. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1407-0>.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; WALL, F.. **Rare Earth Elements: minerals, mines, magnets (and more).** *Elements*, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 333-340, 1 out. 2012. Mineralogical Society of America. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.8.5.333>.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; ZAITSEV, A. N. **Rare Earth Mineralization in Igneous Rocks: sources and processes.** *Elements*, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 347-353, 1 out. 2012. Mineralogical Society of America. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.8.5.347>.

CHAVES, C. D. R. **Petrografia e Geocronologia da Monazita Hidrotermal do Pertita Granito do Complexo Intrusivo Lavras do Sul/RS.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/65638>. Acesso em: 10 mai. 2024

CHEMALE JR., F. **Evolução Geológica do Escudo Sul Rio-grandense.** *Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Editora Gráfica da UFRGS. p 03-44.2000.

COSTA, P.; OLIVEIRA, B. **ZONEAMENTO E POTENCIALIDADE DE ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR) DO GRANITO DE ACARI-RN.** *Proceedings of the VIII Simpósio Brasileiro e Geofísica*, 1 jan. 2018.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos.** Rio de Janeiro: Lasa Prospecções, 2010. Programa Geologia do Brasil - PGB. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10948>

CUNHA, M. do C.; NARDI, L. V. S.; FORMOSO, M. L. L. **Absorção e fracionamento dos elementos terras raras por vegetais: estudo comparativo em plantas ocorrentes em diferentes contextos geológicos.** Geologia USP. Série Científica, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 53-59, 2010. DOI: 10.5327/Z1519-874X2010000100005. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/article/view/27476>. Acesso em: 20 set. 2023.

CUNHA, M. do C.; NARDI, L. V. S.; MULLER, I. F.. **Biogeochemistry of REE elements and tetrad effect in the soil-plant system: a study on volcanic rock covers in southernmost Brazil.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 84, n. 4, p. 911–918, dez. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0001-37652012005000069>.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist.** Cambridge: Cambridge University Press. (2014)

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. **Interpretation of aerial gamma-rays surveys - adding the geochemical factors,** AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(2): p.187–200, 1997.

DUNN, C. E., **Biogeochemistry in mineral exploration(Vol. 9).** Elsevier. (2011)

MATURANA FILHO, S. R. **Diagnóstico e caracterização das concentrações de elementos de terras-raras (ETR) na região central do escudo Sul-Rio-Grandense, estado do Rio Grande do Sul.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/898>. Acesso em: 20 set. 2023.

FORD, K.L.; DILABIO, R.N.W.; RENCZ, A.N.. **Geological, geophysical and geochemical studies around the Allan Lake carbonatite, Algonquin Park, Ontario.** Journal Of Geochemical Exploration, [S.L.], v. 30, n. 1-3, p. 99-121, jan. 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742\(88\)90054-4](http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742(88)90054-4).

Fu, F. *et al.* **The variation of REE (rare earth elements) patterns in soil-grown plants: a new proxy for the source of rare earth elements and silicon in plants.** *Plant and Soil* 235, 53–64, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1011837326556>

GASTAL, M. D. C. *et al.* **REINTERPRETAÇÃO DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS, DE ACORDO COM OS SISTEMAS VULCANO-PLUTÔNICOS DE SUBSIDÊNCIA. PARTE 1:** geologia, geofísica e geocronologia (207pb/206pb/238u). *Revista Brasileira de Geociências*, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 109-124, 1 mar. 2006. Sociedade Brasileira de Geologia. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2006361109124>.

GASTAL, M. D. C. *et al.* **Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-riograndense: dados geofísicos e estruturais.** *Brazilian Journal Of Geology*, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 217-241, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/23174889201500020004>.

GASTAL, M. C. P. & LAFON, J. M. **Gênese e evolução dos granitóides metaluminosos de afinidade alcalina da porção oeste do Escudo Sul-riograndense: geoquímica e isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb.** *Rev. Bras. Geoc.* 28(1), 11-28, 1998.

HENDERSON, P. **General geochemical properties and abundances of the rare earth elements.** In: HENDERSON, P. (Ed.). *Developments in geochemistry, rare earth element geochemistry.* Amsterdam: Elsevier, 1984. v. 2, p. 1-32.

HU, Z. *et al.* **Rare Earth Elements in Soils.** *Communications In Soil Science And Plant Analysis*, [S.L.], v. 37, n. 9-10, p. 1381-1420, jun. 2006. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620600628680>.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, M.R. 1989. **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford University Press, New York, 561 p.

JAMBOR, J. L.; SINCLAIR, W.D. **Rare earths and rare-earth deposits in Canada.** Mineral Science Laboratories, Division Report, Draft, p5, 1990. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Energy, Mines and Resource Canada.

KEAREY, P; BROOKS, M; HILL, I. **Geofísica de exploração.** São Paulo: Oficina de textos, 2009. 391p.

Koester, E. *et al.* **A evolução crustal do Escudo Sul-Rio-Grandense sob a perspectiva dos sistemas isotópicos Sr-Nd.** In: A.R. Jelinek; C.A. Sommer (Ed.). Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre, Editora Compasso Lugar-Cultura, p. 13-27.

KOVARIKOVA, M.; TOMASKOVA, I.; SOUDEK, P.. **Rare earth elements in plants.** *Biologia Plantarum*, [S.L.], v. 63, n. 1, p. 20-32, 19 jan. 2019. Institute of Experimental Botany. <http://dx.doi.org/10.32615/bp.2019.003>.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas.** DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20 pp. 2000. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em 23 out. 2023.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; SANTOS, R. L. C. **Terras raras no Brasil: reservas e características químico-mineralógicas de suas ocorrências e depósitos..** In: O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p.69-144.

LIZ, J. D. **Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (RS): petrologia, geoquímica de elementos-traço em zircão e aplicação de sliding normalization na avaliação de fontes magmáticas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.

LONG, K. R. *et al.* **The principal rare earth elements deposits of the United State:** a summary of domestic deposits and a global perspective, scientific investigations report 2010–5220. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 2010. 96 p. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5220/>>. Acesso em: 10 out. 2023.

MARIANO, A. N.; MARIANO JR, A. **Rare earth mining and exploration in North America**. Elements, v. 8, n. 5, p. 369-376, 1 out. 2012. Mineralogical Society of America. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.8.5.369>.

MARTINS, T. S.; ISOLANI, P. C. **Terras raras: aplicações industriais e biológicas**. Química Nova, v. 28, n. 1, p. 111-117, fev. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000100020>.

MEXIAS, A. S. **Alteração Hidrotermal e Mineralização de Ouro Associada no Distrito Aurífero de Lavras do Sul/RS – Área do bloco do Butiá**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000.

MORALES, B. 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. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/2166>. Acesso em: 20 set. 2023.

NARDI, L.V.S. 1984. **Geochemistry and Petrology of the Lavras Granite Complex, RS, Brazil**. Tese de Doutorado, Universidade de Londres, 268p.

OLIVEIRA, A. S. D. DE. **Modelagem geoestatística do depósito de terras raras Área Zero, Araxá (MG)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências e meio ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JR, F.; LOPES, R. da C. **A Bacia do Camaquã**. In: **Geologia do Rio Grande do Sul**. HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Ed.) Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2000. p. 231-275.

PAIM, P. S. G., Chemale Junior, F., & Wildner, W. (2014). **ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DA BACIA DO CAMAQUÃ (RS)**. Ciência E Natura, 36(3), 183–193. <https://doi.org/10.5902/2179460X13748>.

POLIAKOVSKA, K.; ANNESLEY, I.R.; HAJNAL, Z. **Geophysical Constraints to the Geological Evolution and Genesis of Rare Earth Element–Thorium–Uranium Mineralization in Pegmatites at Alces Lake, SK, Canada.** *Minerals*, v. 14, n. 1, p. 25–25, 25 dez. 2023. <https://doi.org/10.3390/min14010025>

PAYE, H. *et al.* **Distribution and fractionation of the rare earth elements in Brazilian soils.** *Journal Of Geochemical Exploration*, [S.L.], v. 161, p. 27-41, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.09.003>.

POPOFF, C.C. **Computing Reserves of Mineral Deposits: Principles and Conventional Methods.** Washington, Bureau of Mines, 113 p. 1966.

REMUS, V. D.; HARTMANN, L.A.; FORMOSO, M.L.L.. **Os Parões de elementos terras raras (ETR) e a afinidade geoquímica Komatítica dos xistos magnesianos e rochas associadas do Complexo Cambaizinho, São Gabriel/RS.** *Revista Brasileira de Geociências*, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 370-387, 1 dez. 1993. Sociedade Brasileira de Geologia. <http://dx.doi.org/10.25249/03757536.1993234370387>.

ROCHA, E. A. **Avaliação da taxa de Dose Devido Aos Granitos Ornamentais Em Ambientes Públicos e Privados Na Cidade do Recife-Pernambuco-Brasil.** Pernambuco, 2012. Tese (Doutorado) – Pós – Graduação em Tecnologias energéticas e nucleares. Centro de tecnologia e geociência da Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

ROCIO, M. *et al.* **Terras Raras: situação atual e perspectivas.** BNDES Setorial, n. 35, mar. 2012, p. 369-420, 2012.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation.** 2012. ed. Nova Iorque, NY, USA: Springer, 2014.

RUDNICK, R.L.; GAO, S. **Composition of the Continental Crust.** *Treatise On Geochemistry*, [S.L.], p. 1-64, 2003. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>.

SGB – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projetos aerogeofísicos: 1010 – Projeto geofísico Camaquã (Área I)**. Disponível em:
<https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html>

SHAH, A. K. *et al.* **Integrated geophysical imaging of rare earth element-bearing iron oxide-apatite deposits in the Eastern Adirondack Highlands, New York**. *GEOPHYSICS*, v. 86, n. 1, p. B37–B54, 1 jan. 2021.

SASTRI, V. S. *et al.* **Modern Aspects of Rare Earths and Their Complexes**. Amsterdam: Elsevier, 2003.

SAPUCAIA, N.S. **Diferenciação litológica, teores de potássio, urânio e tório e taxa de produção de calor radiogênico do embasamento cristalino de bacias de Camamu e Almada**. Salvador, 2004. 72f. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2004.

SATTERLY, J. **Aeromagnetic maps of carbonatite-alkalic complexes in Ontario**. Ontario Department of Mines and Northern Affairs, Preliminary Map. 1970.

SINCLAIR, A.J.; BLACKWELL, G.H. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 2004.

SHIVES, R. B., CHARNBONNEA, B. W.; FORD, K. L. **The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry — Recognition of alteration related to mineralization**. *Geophysics*, 65, 2001–2011, 2000.

TAKEHARA, L *et al.* **Avaliação do potencial de terras raras no Brasil**. Brasília: CPRM, 2015. 212 p. Informe de Recursos Minerais. (Série Minerais estratégicos, n. 2). Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16923>. Acesso em 10 set. 2003.

TAO, Y. *et al.* **Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: a review**. *Environmental Pollution*, [S.L.], v. 298, p. 118540, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118540>.

THOMAS, M.D.; FORD, K.L.; KEATING, P.. **Review paper: exploration geophysics for intrusion :hosted rare metals.** Geophysical Prospecting, [S.L.], v. 64, n. 5, p. 1275-1304, 23 mar. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2478.12352>.

VAN GOSEN, B. S. *et al.* **Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: Rare-earth elements.** Professional Paper, 2017. <https://doi.org/10.3133/pp18020>

WANG, M. *et al.* **The critical role of potassium in plant stress response.** International Journal of Molecular Sciences, abr. 2013. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>

YANG L H. *et al.* **The effect of EDTA on rare earth elements bioavailability in soil ecosystem.** Chemosphere, [S.L.], v. 38, n. 12, p. 2825-2833, maio 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0045-6535\(98\)00496-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0045-6535(98)00496-2).

ZHANG, Z. Y. *et al.* **Distribution characteristics of rare earth elements in plants from a rare earth ore area.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 252(3), 461-465, 2002. <https://doi.org/10.1023/a:1015834232718>

ANEXO A

Resultado da geoquímica total das amostras de rocha e planta

Amostras (%)	1	2	3	4	7	9	12
SiO_{2r}	70,96	69,84	70,58	69,22	74,41	69,63	71,95
SiO_{2p}	2,24	6,17	1,58	1,69	2,36	2,82	1,58
K₂Or	3,94	3,52	3,66	3,26	4,18	3,42	4,97
K₂Op	1,90	2,20	1,83	1,76	1,52	1,38	1,55
TiO_{2r}	0,25	0,29	0,26	0,28	0,31	0,32	0,27
TiO_{2p}	0,01	0,02	0,003	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe₃O_{2r}	2,27	2,21	2,16	2,50	1,79	2,64	2,54
Fe₃O_{2p}	0,04	0,14	0,02	0,05	0,04	0,10	0,05
Thr	10,60	10,70	9,10	9,00	9,50	10,70	22,20
Thp	1,80	6,30	0,80	3,90	2,40	11,00	5,40
ppm							
Lar	24,40	15,10	23,70	26,30	44,90	36,10	62,80
Lap	5,70	23,20	4,00	35,70	11,10	130,00	89,90
Cer	47,20	38,10	44,50	49,70	41,30	62,30	129,00
Cep	11,00	38,10	6,40	47,40	18,60	135,00	85,70
Ndr	18,80	13,00	16,40	19,20	25,90	24,20	62,40
Ndp	2,90	14,50	2,30	19,30	7,70	86,40	66,90
Gdr	2,90	2,30	2,10	2,50	2,80	3,20	11,70
Gdp	0,40	1,80	0,30	2,00	1,10	13,60	10,50
Yr	12,00	10,00	9,00	11,00	11,00	14,00	47,00
Yp	2,00	8,00	2,00	10,00	6,00	56,00	49,00

Fonte: Autor

ANEXO B

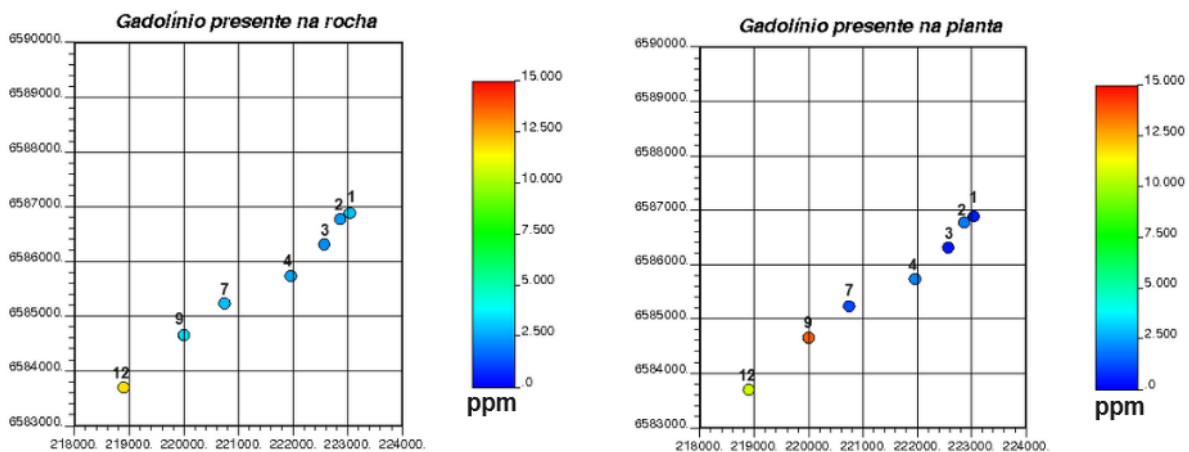
Valores extremos e *outliers* do banco de dados

Amostras	1	2	3	4	7	9	12	Outlier	Valor Extremo
SiO₂r	70,96	69,84	70,58	69,22	74,41	69,63	71,95	72,95	74,95
SiO₂p	2,24	6,17	1,58	1,69	2,36	2,82	1,58	3,53	4,7
K₂Or	3,94	3,52	3,66	3,26	4,18	3,42	4,97	4,72	5,50
K₂Op	1,90	2,20	1,83	1,76	1,52	1,38	1,55	2,30	2,76
TiO₂r	0,25	0,29	0,26	0,28	0,31	0,32	0,27	0,34	0,38
TiO₂p	0,0070	0,022	0,0030	0,0070	0,0070	0,014	0,006	0,0085	0,01
Fe₃O₂r	2,27	2,21	2,16	2,50	1,79	2,64	2,54	3,01	3,52
Fe₃O₂p	0,04	0,14	0,02	0,05	0,04	0,10	0,05	0,065	0,08
Thr	10,60	10,70	9,10	9,00	9,50	10,70	22,20	13,1	15,50
Thp	1,80	6,30	0,80	3,90	2,40	11,00	5,40	13,05	19,8
Lar	24,40	15,10	23,70	26,30	44,90	36,10	62,80	54,70	73,30
Lap	5,70	23,20	4,00	35,70	11,10	130,00	89,90	80,70	125,70
Cer	47,20	38,10	44,50	49,70	41,30	62,30	129,00	62,30	74,90
Cep	11,00	38,10	6,40	47,40	18,60	135,00	85,70	101,75	156,20
Ndr	18,80	13,00	16,40	19,20	25,90	24,20	62,40	35,90	47,60
Ndp	2,90	14,50	2,30	19,30	7,70	86,40	66,90	43,90	68,50
Gdr	2,90	2,30	2,10	2,50	2,80	3,20	11,70	3,80	4,70
Gdp	0,40	1,80	0,30	2,00	1,10	13,60	10,50	4,40	6,80
Yr	12,00	10,00	9,00	11,00	11,00	14,00	47,00	13,50	15,00
Yp	2,00	8,00	2,00	10,00	6,00	56,00	49,00	22,00	34,00

Fonte: Autor

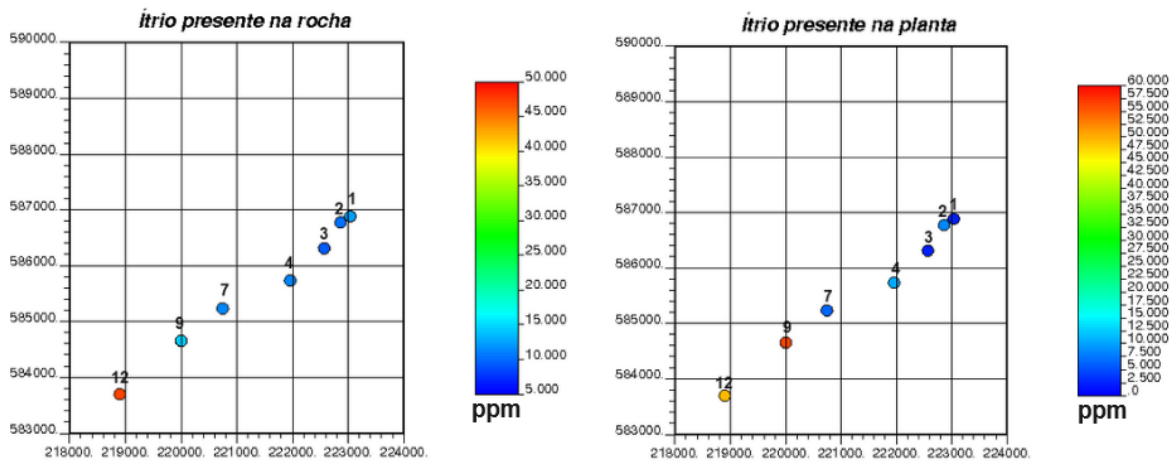
ANEXO C

Mapa de localização do gadolínio em rochas e plantas



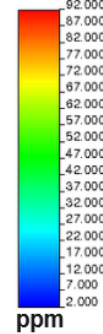
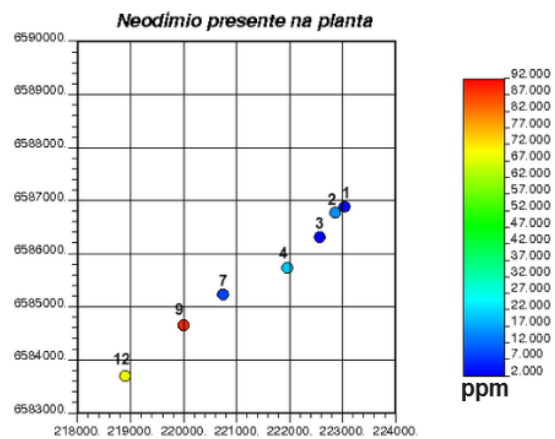
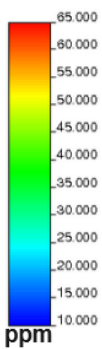
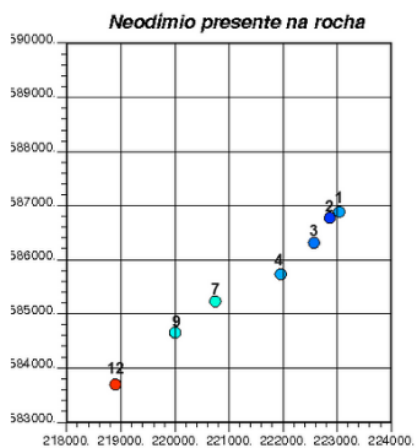
Fonte: Autor

Mapa de localização do ítrio em rochas e plantas



Fonte: Autor

Mapa de localização do neodímio em rochas e plantas



Fonte: Autor