

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**FELIPE NOGUEIRA SCARSI**  
**MURILO LUIZ BORGES DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA PRELIMINAR DE AMOSTRAS DE ARGILA  
PORTADORAS DE TERRAS RARAS, COLETADAS EM UM PERFIL NA REGIÃO  
DE POÇOS DE CALDAS, MG**

Poços de Caldas/MG

2025

FELIPE NOGUEIRA SCARSI  
MURILO LUIZ BORGES DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA PRELIMINAR DE AMOSTRAS DE ARGILA  
PORTADORAS DE TERRAS RARAS, COLETADAS EM UM PERFIL NA REGIÃO  
DE POÇOS DE CALDAS, MG

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Ciência e  
Tecnologia da Universidade Federal de  
Alfenas, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência  
e Tecnologia.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Carolina Del Roveri

Poços de Caldas (MG)

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Silva, Murilo Luiz Borges da.

Caracterização tecnológica preliminar de amostras de argilas portadoras de Terras Raras, coletadas em um perfil na região de Poços de Caldas, MG / Murilo Luiz Borges da Silva, Felipe Nogueira Scarsi. - Poços de Caldas, MG, 2025.

49 f. : il. -

Orientador(a): Carolina Del Roveri.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Elementos de Terras Raras. 2. Argilas Iônicas. 3. Poços de Caldas. 4. Caracterização Tecnológica. 5. Capacidade de Troca Catiônica. I. Scarsi, Felipe Nogueira . II. Roveri, Carolina Del, orient. III. Título.

FELIPE NOGUEIRA SCARSI  
MURILO LUIZ BORGES DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA PRELIMINAR DE AMOSTRAS DE ARGILA  
PORTADORAS DE TERRAS RARAS, COLETADAS EM UM PERFIL NA REGIÃO  
DE POÇOS DE CALDAS, MG

A Banca Examinadora abaixo-assinada  
aprova o Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Ciência e Tecnologia pela  
Universidade Federal de Alfenas.

Aprovado em: 04/12/2025

Prof. Dr. Carolina Del Roveri:  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Matheus Fernando Ancelmi  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Vilson Carlesso dos Reis  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

## RESUMO

Este trabalho apresentou a caracterização tecnológica preliminar de um perfil de intemperismo enriquecido em Elementos de Terras Raras (ETR) localizado no Complexo Alcalino de Poços de Caldas (MG), região reconhecida por sua expressiva alteração intempérica e potencial para formação de depósitos do tipo argilas de adsorção iônica (Ion-Adsorption Clays – IAC). O estudo teve como objetivo avaliar propriedades físico-químicas fundamentais para compreender o mecanismo de retenção dos ETR ao longo do perfil laterítico. Foram analisados: umidade gravimétrica, cor do solo (Sistema Munsell), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) pelo método do azul de metileno, composição química por e ICP-MS após digestão ácida, além da radioatividade natural por detector Geiger. Os resultados obtidos indicaram a presença de um manto de alteração maduro, com cores claras e baixo croma, sugerindo predomínio de caulinita e halloysita. Os valores de CTC mostraram-se compatíveis com materiais ricos em argilominerais de baixa cristalinidade, aptos à adsorção de íons trivalentes. A análise química revelou concentrações relevantes de ETR, distribuídas de forma heterogênea nos horizontes, reforçando a mobilização em solução e posterior fixação em superfícies reativas. As medições radiométricas confirmaram a associação natural entre ETR, tório e urânio, típica de complexos alcalinos. Os resultados demonstram que o perfil estudado apresenta características compatíveis com sistemas IAC, indicando potencial para exploração futura. A caracterização realizada forneceu subsídios iniciais importantes para etapas posteriores de lavra, beneficiamento, avaliação metalúrgica e estudos econômicos aplicados a depósitos brasileiros de terras raras.

**Palavras-chave:** Elementos de Terras Raras; Argilas Iônicas; Poços de Caldas; Caracterização Tecnológica; Capacidade de Troca Catiônica; Intemperismo.

## ABSTRACT

This work presented the preliminary technological characterization of a weathering profile enriched in Rare Earth Elements (REE) located in the Poços de Caldas Alkaline Complex (MG), a region recognized for its significant weathering and potential for the formation of ion-adsorption clay (IAC) type deposits. The study aimed to evaluate fundamental physicochemical properties to understand the retention mechanism of REE along the lateritic profile. The following were analyzed: gravimetric moisture, soil color (Munsell System), Cation Exchange Capacity (CEC) by the methylene blue method, chemical composition by ICP-MS after acid digestion, in addition to natural radioactivity using a Geiger detector. The results indicated the presence of a mature weathering mantle, with light colors and low chroma, suggesting the predominance of kaolinite and halloysite. The CEC values were compatible with materials rich in low-crystallinity clay minerals, suitable for the adsorption of trivalent ions. The chemical analysis revealed relevant concentrations of REE, heterogeneously distributed across the horizons, reinforcing their mobilization in solution and subsequent fixation on reactive surfaces. Radiometric measurements confirmed the natural association between REE, thorium, and uranium, typical of alkaline complexes. The results demonstrate that the studied profile presents characteristics consistent with IAC systems, indicating potential for future exploitation. The characterization carried out provided important initial insights for subsequent stages of mining, beneficiation, metallurgical evaluation, and economic studies applied to Brazilian rare earth deposits.

**Keywords:** Rare Earth Elements; Ion-Adsorption Clays; Poços de Caldas; Technological Characterization; Cation Exchange Capacity; Weathering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos de Terras Raras .....	13
Figura 2 – Modelo de adsorção .....	15
Figura 3 – Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas.....	16
Figura 4 – Perfil da divisão de horizontes .....	17
Figura 5 – Esquema do ICP-MS .....	20
Figura 6 – Trincheira .....	22
Figura 7 – Coleta das amostras .....	23
Figura 8 – Processo de secagem em estufa .....	24
Figura 9 – Destorroamento .....	25
Figura 10 – CTC .....	26
Figura 11 – Equipamento para ICP .....	27
Figura 12 – Separação das amostras .....	28
Figura 13 – Carta Munsell .....	29
Figura 14 – Divisão geral dos perfis .....	31
Figura 15 – Paleta de cores dos horizontes .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Profundidade dos horizontes no perfil PCD-1 .....	23
Tabela 2 – Massa Úmida .....	31
Tabela 3 – Massa Seca .....	32
Tabela 4 – Umidade Gravimétrica .....	32
Tabela 5 – Dados necessários para o teste de CTC .....	34
Tabela 6 – Gotas necessárias para a troca catiônica .....	34
Tabela 7 – Volume de Azul de Metileno .....	35
Tabela 8 – Capacidade de Troca Catiônica .....	35
Tabela 9 – Profundidade e classificação de cor Munsell .....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – PPM de elementos de terras raras leves (LREE) .....	38
Gráfico 2 – PPM de elementos de terras raras médios (MREE) .....	38
Gráfico 3 – PPM de elementos de terras raras pesadas (HREE) .....	39
Gráfico 4 – PPM de elementos de terras raras totais (TREE) .....	40
Gráfico 5 – Primeira medição do contador Geiger .....	41
Gráfico 6 – Segunda medição do contador Geiger .....	41
Gráfico 7 – Média combinada das medições do contador Geiger .....	42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	11
1.2	OBJETIVOS .....	11
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	ELEMENTOS DE TERRAS RARAS (ETR) .....	13
2.2	DEPOSIÇÃO DE ARGILA DE ADSORÇÃO IÔNICA .....	14
2.3	CONTEXTO GEOLÓGICO DA REGIÃO DE POÇOS DE CALDAS .....	15
2.4	PEDOGÊNESE E PERFIS DE INTEMPERISMO EM CLIMA TROPICAL .....	17
2.5	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ARGILAS .....	17
<b>2.5.1</b>	<b>Capacidade de troca catiônica e mecanismos de adsorção</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Colorimetria (MUNSELL)</b> .....	<b>18</b>
2.6	ANÁLISE GEOQUÍMICA POR ICP-MS .....	19
2.7	RADIOATIVIDADE NATURAL .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
3.1	COLETA DE AMOSTRAS DA TRINCHEIRA .....	22
<b>3.1.1</b>	<b>Processo de amostragem nos horizontes</b> .....	<b>22</b>
3.2	PREPARAÇÃO TÉCNICA .....	23
<b>3.2.1</b>	<b>Secagem em estufa</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Destorroamento</b> .....	<b>25</b>
3.3	CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC) .....	26
3.4	ANÁLISES QUÍMICAS PELO MÉTODO ICP .....	27
3.5	MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO COM CONTADOR GEIGER .....	28
3.6	DEFINIÇÃO DA COR PELA CARTA MUNSELL .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>30</b>
4.1	UMIDADE DAS AMOSTRAS .....	31
<b>4.1.1</b>	<b>Cálculo da umidade gravimétrica</b> .....	<b>32</b>
4.2	CÁLCULO CTC .....	34
4.3	RESULTADOS ANÁLISES QUÍMICAS .....	36
4.4	MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO COM CONTADOR GEIGER .....	40
4.5	DETERMINAÇÃO DA COR DE SOLO .....	43
4.6	CORRELAÇÃO ENTRE CTC E ANÁLISES QUÍMICAS .....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por tecnologias de alto desempenho, associada à transição energética global, tem ampliado o interesse estratégico pelos Elementos de Terras Raras (ETR). Esses elementos são empregados na fabricação de superímãs permanentes, turbinas eólicas, veículos elétricos, dispositivos eletrônicos, catalisadores industriais e outros componentes essenciais (USGS, 2024; Borst et al., 2020). Embora sua abundância crustal não seja necessariamente baixa, a extração economicamente viável dos ETR depende da ocorrência de ambientes geológicos específicos capazes de concentrá-los em formas acessíveis (Gouvêa et al., 2014).

Dentre esses ambientes, destacam-se os depósitos conhecidos como Ion-Adsorption Clays (IAC), cuja gênese está associada ao intemperismo profundo de rochas ígneas alcalinas, especialmente em regiões de clima tropical, onde a laterização e a pedogênese promovem forte lixiviação e mobilização geoquímica (Chi; Tian, 2008; Resende et al., 2014). Ao contrário dos depósitos primários, nos quais os ETR encontram-se incorporados na estrutura cristalina de minerais resistentes, os depósitos IAC apresentam os elementos retidos por adsorção física na superfície de argilominerais como caulinita e halloysita (Souza Santos, 1992; Kämpf; Curi, 2012).

O Brasil possui condições geológicas favoráveis para esse tipo de mineralização, com destaque para o Complexo Alcalino de Poços de Caldas, considerado um dos maiores maciços alcalinos do mundo (Ulbrich et al., 2002; Schorscher; Shea, 1992). Esse complexo apresenta rochas ricas em elementos incompatíveis, incluindo zircônio, tório e terras raras, e desenvolveu perfis de intemperismo espessos de grande interesse científico e econômico (CPRM, 2021; Rocha et al., 2011). Estudos apontam que a combinação de rochas alcalinas ricas em ETR e clima úmido favorece a formação de perfis lateríticos com potencial para concentração desses elementos (Gouvêa et al., 2014; Embrapa, 2018).

Apesar do crescente interesse mundial nesse tipo de depósito, o conhecimento sobre as características tecnológicas das argilas de Poços de Caldas ainda apresenta lacunas importantes, especialmente no que diz respeito à

capacidade de troca catiônica, comportamento geoquímico, mineralogia e retenção dos ETR (Pinto, 2006). A simples presença de ETR não garante viabilidade econômica; é necessário compreender parâmetros físico-químicos responsáveis pela retenção e possível extração dos elementos.

Diante desse cenário, o presente trabalho propôs a caracterização tecnológica preliminar de um perfil de intemperismo enriquecido em terras raras localizado na região do Capão do Mel, no Complexo Alcalino de Poços de Caldas. O objetivo é fornecer uma base técnico-científica para estudos futuros de lavra, beneficiamento, avaliação metalúrgica e investigação econômica, contribuindo para o avanço da pesquisa nacional sobre depósitos estratégicos de ETR.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste trabalho justifica-se pela necessidade premente de ampliar o conhecimento geológico e tecnológico sobre as argilas portadoras de terras raras na região de Poços de Caldas. Embora a área seja reconhecida como um depósito confirmado, existe uma lacuna significativa na literatura técnica referente à pré- caracterização específica destes materiais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Realizar a caracterização tecnológica preliminar de um perfil de argilas iônicas portadoras de Elementos de Terras Raras (ETR) na região de Poços de Caldas (MG), determinando suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas essenciais para compreender o comportamento do material e seu potencial tecnológico.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a preparação física das amostras de diferentes horizontes através da limpeza de materiais orgânicos, da separação em subamostras, da secagem e do destorroamento;

- Determinar a umidade gravimétrica e classificar a cor das amostras secas (Carta Munsell);
- Avaliar a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) pelo método do Azul de Metileno, definindo a reatividade do material;
- Interpretar a composição química das amostras, quantificando os teores de elementos de terras raras (ETR);
- Medir a atividade radiométrica natural das amostras utilizando contador Geiger;
- Determinar se há correlação entre a Capacidade de Troca Catiônica e as Análises químicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ELEMENTOS DE TERRAS RARAS (ETR)

Os Elementos de Terras Raras (ETR) compreendem um conjunto de 17 elementos químicos da Tabela Periódica, formado pela série dos lantanídeos, adicionados do Escândio (Sc) e do Ítrio (Y). A inclusão destes dois últimos elementos no grupo justifica-se por apresentarem comportamento geoquímico semelhante aos lantanídeos e por ocorrerem frequentemente associados nos mesmos depósitos minerais (USGS, 2024). Embora a nomenclatura sugira escassez, esses elementos não são raros em termos de abundância crustal, sendo o termo uma referência histórica à dificuldade de separação individual dos metais devido às suas propriedades químicas próximas.

Para fins comerciais e geológicos, os ETR são usualmente classificados em dois subgrupos principais, conforme apresentado na Figura 1: As Terras Raras Leves (ETRL) e as Terras Raras Pesadas (ETRP), podendo existir até mesmo um terceiro subgrupo chamado Terras Raras Médias (ETPR), porém, não é tão usual. O grupo das Terras Raras Leves engloba os elementos de menor número atômico, do Lantânio ao Európio, que são tipicamente mais abundantes na crosta terrestre. Já o grupo das Terras Raras Pesadas estende-se do Gadolínio ao Lutécio e inclui o Ítrio. Mesmo apresentando baixo número atômico, o Ítrio é classificado junto aos elementos pesados devido ao seu raio iônico e comportamento geoquímico similares aos HREE (Borst et al., 2020).

**Figura 1:** Elementos de Terras Raras

Elementos de Terras-Raras

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
		* La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu															
		** Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr															

Elementos de Terras-Raras Leves
  Elementos de Terras-Raras Pesados

**Fonte:** Adaptado de IUPAC (2021)

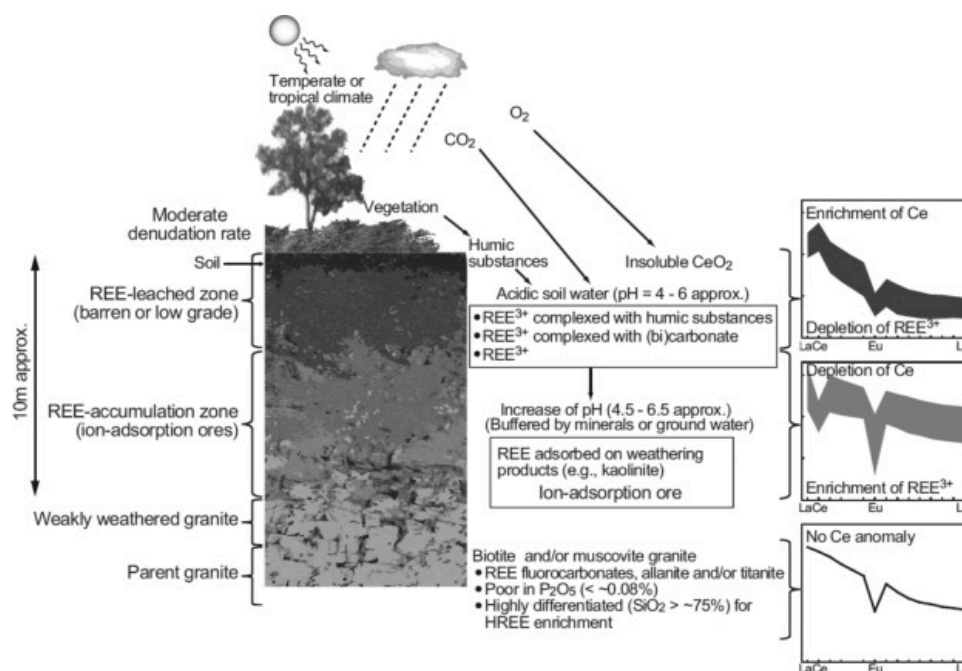
A distinção entre esses grupos é fundamental para a viabilidade econômica de projetos de mineração. As argilas iônicas chinesas, por exemplo, destacam-se no cenário global justamente por serem fontes enriquecidas em Terras Raras Pesadas, que possuem maior valor de mercado e são críticas para aplicações tecnológicas modernas, como superímãs e componentes para veículos elétricos (Borst et al., 2020). Essa característica estratégica diferencia depósitos como o estudado neste trabalho das fontes primárias convencionais, que tendem a ser dominadas pelos elementos leves.

## 2.2 DEPÓSITOS DE ARGILAS DE ADSORÇÃO IÔNICA

Os depósitos de argilas de adsorção iônica, internacionalmente referidos como Ion-Adsorption Clays (IAC), representam uma classe estratégica de recursos minerais formados pelo intemperismo químico intenso de rochas ígneas ricas em terras raras, como granitos e sienitos. Diferentemente dos depósitos primários, onde os elementos de terras raras estão presos na estrutura cristalina de minerais complexos, nestes depósitos secundários os íons de terras raras encontram-se adsorvidos fisicamente na superfície de argilominerais, principalmente caulinita e halloysita (Borst et al., 2020).

A gênese destes depósitos está ligada a condições climáticas tropicais e subtropicais, que favorecem a lixiviação das rochas matrizes. Durante esse processo pedogenético, os minerais primários contendo terras raras são decompostos, liberando os íons lantanídeos na solução do solo. Estes cátions migram para baixo no perfil de intemperismo e fixam-se, por atração eletrostática, nas camadas dos filossilicatos formados in situ, caracterizando o modelo clássico de adsorção iônica (Chi; Tian, 2008). A Figura 2 ilustra esquematicamente esse modelo de adsorção, destacando a facilidade com que esses íons podem ser recuperados através de processos simples de troca iônica.

**Figura 2:** Modelo de adsorção

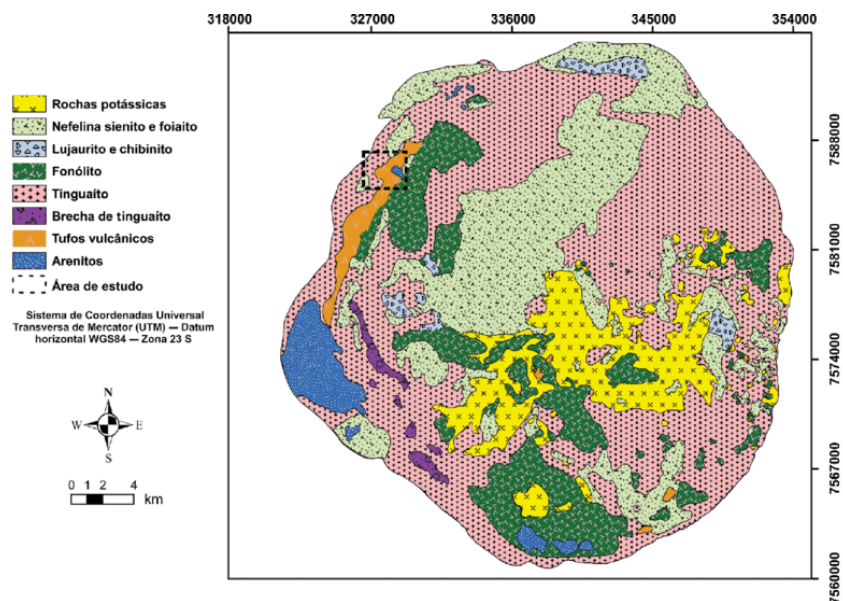


**Fonte:** Adaptado de Chi & Tian (2008)

### 2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO DA REGIÃO DE POÇOS DE CALDAS

A área de estudo insere-se no contexto do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, uma das maiores estruturas ígneas alcalinas do mundo, abrangendo uma área de aproximadamente 800 km<sup>2</sup> na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. O complexo formou-se no Cretáceo Superior, com idades estimadas em torno de 75 a 80 milhões de anos, resultante de intenso magmatismo intraplaca (Ulbrich et al., 2002).

A litologia do maciço é dominada por rochas insaturadas em sílica e ricas em álcalis, destacando-se os fonólitos e os nefelina-sienitos (como tinguaitos, foiaítos e lujauritos). Estas rochas constituem os protólitos (rochas-mãe) do depósito estudado e são reconhecidas mundialmente por suas anomalias geoquímicas, apresentando concentrações naturais elevadas de zircônio, urânio e, notavelmente, Elementos de Terras Raras (ETR) (Schorscher; Shea, 1992). A Figura 3 apresenta o mapa geológico do complexo, situando a predominância dessas litologias na região.

**Figura 3:** Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas

**Fonte:** Adaptado de CPRM (2021)

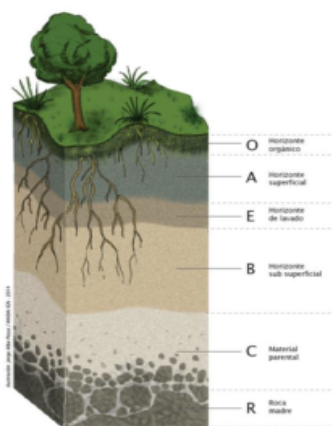
O fator determinante para a formação do depósito de argilas de adsorção iônica (IAC) nesta região é o profundo manto de intemperismo desenvolvido sobre estas rochas alcalinas. Devido às condições climáticas tropicais, com alta pluviosidade e temperaturas amenas, as rochas primárias sofrem intensa alteração intempérica (lateritização). Nesse processo, os minerais primários são hidrolisados, resultando na lixiviação de elementos móveis e na formação residual de minerais de argila, como a caulinita e a halloysita, além de bauxita em topos de morro (Gouvea et al., 2014).

É neste perfil pedológico espesso, especificamente nos horizontes de saprolito e solo, que ocorre a reconcentração secundária das terras raras. À medida que a rocha se altera, os íons de lantanídeos são liberados e prontamente adsorvidos na superfície dos argilominerais, criando o horizonte enriquecido alvo desta caracterização tecnológica. A presença de um perfil de alteração maduro, evidenciado pelas cores claras e pela mineralogia caulinitica descrita nos resultados deste trabalho, confirma o alto potencial da área para este tipo de mineralização (Rocha et al., 2011).

## 2.4 PEDOGÊNESE E PERFIS DE INTEMPERISMO EM CLIMA TROPICAL

A formação de solos lateríticos está fortemente associada a ambientes tropicais, onde predominam clima quente e úmido, favorecendo processos intensos de intemperismo químico. Durante a laterização, minerais primários são progressivamente alterados, liberando sílica em solução e concentrando óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que passam a caracterizar o perfil do solo (Resende et al., 2014). Esse processo também influencia diretamente o comportamento geoquímico dos elementos terras raras (ETRs), que tendem a se distribuir de acordo com a profundidade e com a natureza de cada horizonte (Kämpf; Curi, 2012).

**Figura 4:** Perfil da divisão de horizontes



**Fonte:** Adaptado de Embrapa (2018)

## 2.5 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ARGILAS

A caracterização de minerais argilosos para fins de prospecção de terras raras depende da compreensão de propriedades intrínsecas que regem a interação entre a fase sólida (mineral) e a fase iônica (metais) (Souza Santos, 2010).

### 2.5.1 Capacidade de troca catiônica e mecanismos de adsorção

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é um parâmetro fundamental que expressa a quantidade de cargas negativas disponíveis na superfície das partículas do solo ou argilominerais, passíveis de serem neutralizadas por cátions trocáveis

(como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e, no contexto desta pesquisa, os íons de Terras Raras,  $\text{REE}^{3+}$ ) (Pinto, 2006).

Em argilominerais do grupo da caulinita e halloysita, a geração de cargas negativas ocorre principalmente por dois mecanismos: ligações insatisfeitas nas arestas dos cristais (dependente de pH) e, em menor grau, por substituição isomórfica na estrutura cristalina. Devido a esse déficit de carga, a superfície da argila atrai eletrostaticamente cátions dissolvidos na solução do solo (Souza Santos, 2010).

Para depósitos do tipo "adsorção iônica", a CTC é o indicador que determina se o metal está quimicamente adsorvido na superfície (sendo, portanto, recuperável por processos simples de lixiviação com eletrólitos) ou se faz parte da estrutura cristalina de minerais resistentes (o que exigiria processos metalúrgicos complexos). Portanto, valores de CTC correlacionam-se diretamente com o potencial do material em funcionar como uma "armadilha" geoquímica para metais lixiviados (Pinto, 2006).

Além de ser amplamente utilizado na caracterização de solos tropicais e argilas de baixa atividade, o método de determinação de CTC destaca-se por ser de execução simples, rápida e de baixo custo operacional, possibilitando sua aplicação em estudos preliminares de prospecção e avaliação tecnológica.

### **2.5.2 Colorimetria (Munsell)**

A cor do solo é um atributo morfológico que reflete diretamente sua composição química e mineralógica, sendo utilizada como um guia preliminar para a identificação de horizontes e constituintes minerais. A padronização dessa análise é realizada através do Sistema Munsell, que decompõe a cor em três dimensões: Matiz (a cor espectral predominante), Valor (luminosidade) e Cromo (intensidade ou saturação) (Munsell, 2018).

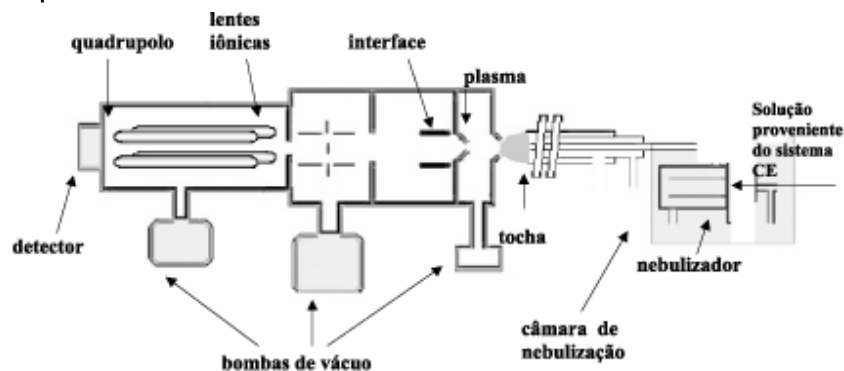
Em perfis de intemperismo tropical, a coloração é governada predominantemente pela presença e estado de oxidação do ferro (Kämpf; Curi, 2012):

- Tonalidades Avermelhadas e Amareladas: Indicam a presença de óxidos e hidróxidos de ferro, como hematita (avermelhada) e goethita (amarelada), sugerindo ambientes oxidantes e com boa drenagem.
- Tonalidades Acinzentadas ou Esbranquiçadas: Sugerem a remoção de óxidos de ferro por lixiviação ou ambientes redutores. Em contextos geológicos de depósitos de argila, cores pálidas e baixo croma estão frequentemente associadas à predominância de caulinita ou halloysita, servindo como indicativo visual de zonas ricas em aluminossilicatos e pobres em contaminantes férricos.

A utilização da Carta Munsell permite, assim, inferir variações na pedogênese e estratificar camadas com diferentes potenciais mineralógicos antes mesmo da realização de ensaios químicos quantitativos (Munsell, 2018).

## 2.6 ANÁLISE GEOQUÍMICA POR ICP-MS

A Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) é uma técnica analítica amplamente utilizada na determinação de elementos traço e ultra traço devido à sua elevada sensibilidade e capacidade de detectar concentrações na faixa de  $\mu\text{g L}^{-1}$  a  $\text{ng L}^{-1}$  (Thomas, 2013). O método funciona pela introdução de uma solução contendo a amostra em um plasma de argônio de alta temperatura (aprox. 8000 K), onde os átomos são ionizados quase completamente. Os íons formados são então direcionados ao espectrômetro de massas, que separa cada espécie química com base na razão massa/carga, permitindo a quantificação precisa de elementos, incluindo terras raras e metais associados, como podemos ver na Figura 5 (Jarvis, 2021).

**Figura 5:** Esquema do ICP-MS

Fonte: Adaptado de Jarvis (2021)

Para que a análise seja possível, é necessária a abertura química das amostras, geralmente por digestão ácida em sistemas de alta pressão ou micro-ondas, garantindo a completa dissolução do material sólido antes da nebulização no ICP-MS (Thomas, 2013). Essa etapa é fundamental para evitar interferências e garantir que todos os elementos presentes na matriz sejam disponibilizados na solução analisada. Devido à sua alta sensibilidade, baixa interferência e amplo intervalo dinâmico, o ICP-MS é considerado um dos métodos mais eficientes para caracterização geoquímica de solos e rochas (Jarvis, 2021).

## 2.7 RADIOATIVIDADE NATURAL

A presença de radioatividade natural é uma característica marcante em diversos depósitos de Elementos de Terras Raras (ETR), especialmente naqueles associados a complexos alcalinos e carbonatitos (L'Annunziata, 2012). Embora os lantanídeos sejam, em sua maioria, isótopos estáveis e não radioativos, eles ocorrem frequentemente em estreita associação geoquímica com elementos da série dos actinídeos, especificamente o Tório e o Urânio (Borst et al., 2020).

Esta correlação ocorre devido a princípios da cristalquímica, notadamente a semelhança nos raios iônicos e nas valências entre os íons de terras raras (principalmente os de carga +3) e os íons de Tório e Urânio. Tal similaridade permite a substituição isomórfica (diadoxia) na estrutura cristalina de minerais acessórios (L'Annunziata, 2012).

A região de Poços de Caldas apresenta níveis naturalmente elevados de radioatividade devido à presença de urânio, tório e minerais associados, característica já amplamente documentada em avaliações radiológicas oficiais conduzidas pela CNEN na Unidade de Caldas (CNEN, 2014).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA DAS AMOSTRAS NA TRINCHEIRA

No dia 12 de fevereiro de 2025, às 15:28, iniciou-se o procedimento de identificação e coleta de amostras no ponto designado pela empresa Meteoric Resources na região do Capão do Mel como demonstrado na Figura 6, a trincheira foi aberta pela mesma. A atividade contou com a presença dos colaboradores da empresa Meteoric Resources, equipe da UNIFAL-MG e dos professores e estudantes do curso de Geologia da Unicamp. Na trincheira houve a divisão em horizontes de amostragem indicada pelos professores da Unicamp como pode-se observar na Figura 7.

**Figura 6:** Trincheira



**Fonte:** Dos Autores

##### 3.1.1 Processo de amostragem nos horizontes

A amostragem ocorreu em um perfil denominado PCD-1 que foi dividido em oito horizontes, a partir de características físicas, sendo essas a textura, estrutura, e cor. Os horizontes foram nomeados como A, B1, B2, B3, Transição, C1, C2 e C3, esses estão respectivamente organizados quando observados de cima a baixo na Figura 9 e possuem respectivas profundidades exemplificadas na tabela 1.

Tabela 1: Profundidade dos horizontes no perfil PCD-1

Horizonte	A	B1	B2	B3	Transição	C1	C2	C3
Profundidade (cm)	10	55	95	140	160	180	210	230

Fonte: Dos autores

**Figura 7:** Coleta das amostras



Fonte: Dos Autores

A retirada das amostras ocorreu por meio de escavação com martelo geológico, pás de pequeno e médio porte, além disso utilizamos sacos de amostragem grandes e uma caneta para identificação. O objetivo era coletar cerca de 5 quilos de cada horizonte. Essas amostras foram destinadas à Unifal Campus Poços de Caldas e divididas em subamostras de 1 quilo para ensaio.

### 3.2 PREPARAÇÃO TÉCNICA

As amostras contendo terras raras coletadas não poderiam ser utilizadas de imediato em razão de suas características físicas. Observou-se elevado teor de umidade, presença significativa de matéria orgânica e compactação natural do

material, fatores que inviabilizam sua aplicação direta em testes laboratoriais. Dessa forma, foi necessário realizar um processo de preparação prévia, visando a adequação das amostras para posterior análise e uso experimental.

### 3.2.1 Secagem em estufa

No processo de secagem, as amostras foram acondicionadas em estufa aquecida a 105 °C durante 24 horas, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 6457, com o objetivo de promover a perda total da umidade presente nas amostras. Para esse procedimento, o material foi distribuído em bandejas previamente identificadas e pesadas, garantindo a rastreabilidade de cada amostra como nas Figuras 8.

Após o período de secagem, realizou-se novamente a pesagem das bandejas contendo o material, possibilitando a comparação entre os valores obtidos antes e depois do aquecimento. Essa diferença de massa corresponde à quantidade de água eliminada, permitindo calcular a umidade gravimétrica das amostras. Este parâmetro é considerado o indicador básico para avaliar o comportamento do material, pois afeta substancialmente as propriedades físicas e químicas das argilas.

**Figura 8:** Processo de secagem em estufa



**Fonte:** Dos Autores

### 3.2.2 Destorroamento

O processo de destorroamento das amostras foi realizado em todos os horizontes coletados, em conformidade com a ABNT NBR 6457:2016, que estabelece os procedimentos para preparação de amostras de solo destinadas a ensaios de compactação e caracterização. Os torrões foram cuidadosamente desagregados, por métodos manuais e mecânicos, a fim de reduzir o material a uma condição adequada para ensaios laboratoriais, preservando-se a fração granulométrica natural e evitando a perda de finos utilizando os materiais da Figura 9.

Após o destorroamento, o material foi fracionado e disposto em sacos devidamente identificados, com marcações referentes ao horizonte de origem, garantindo a rastreabilidade e a organização do processo, além de facilitar a realização dos ensaios subsequentes de caracterização

**Figura 9:** Destorroamento



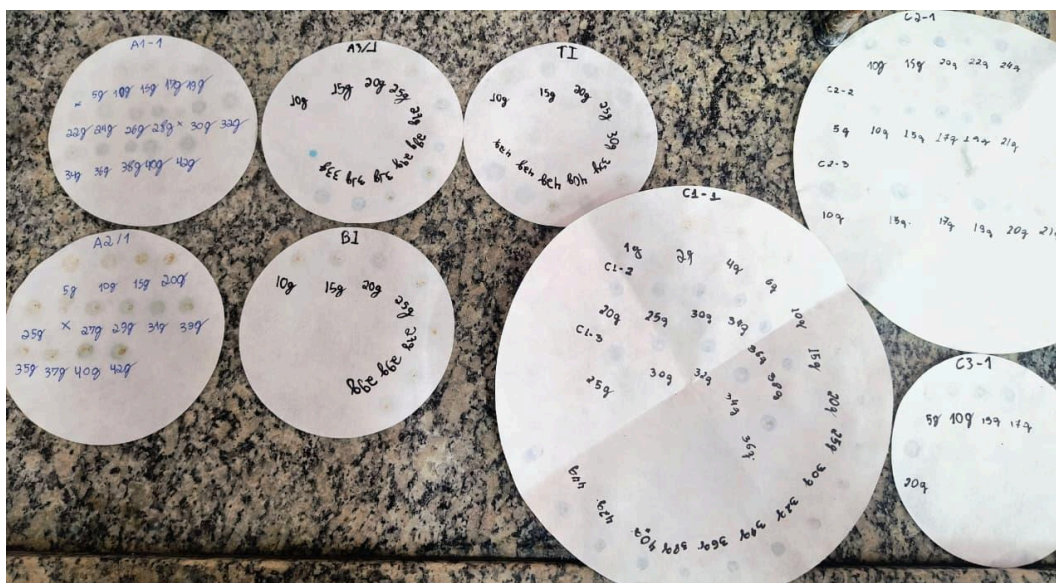
**Fonte:** Dos Autores

### 3.3 CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC)

O procedimento experimental foi conduzido em conformidade com as diretrizes da norma ABNT NBR 13600:1996, sendo que todos os ensaios foram realizados em duplicata para cada horizonte, visando assegurar a representatividade dos resultados. Inicialmente, realizou-se a pesagem de 0,5 g de amostra, que foi transferida para um béquer contendo 50 mL de água destilada, formando a dispersão solo-água necessária para a análise.

A titulação seguiu o método do "teste da mancha" (*spot test*), como pode-se observar na Figura 10 consistindo na adição incremental da solução de azul de metileno (em alíquotas de duas gotas), seguida de agitação por 1 minuto após cada adição, para garantir a interação do corante com as partículas. O monitoramento da reação foi realizado com o auxílio de um bastão de vidro, retirando-se uma gota da suspensão e aplicando-a sobre um papel filtro qualitativo. O ponto final da titulação foi determinado pela formação de um halo azul-claro permanente ao redor da mancha central de sólidos, indicando a saturação da superfície do material e o limite da reação (Pinto, 2006).

**Figura 10:** CTC



**Fonte:** Dos Autores

### 3.4 ANÁLISES QUÍMICAS PELO MÉTODO ICP

As amostras de argila provenientes da área de estudo foram previamente coletadas e identificadas por pesquisadores vinculados à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), seguindo procedimentos de amostragem padronizados. Essas amostras passaram por preparação laboratorial e posteriormente foram analisadas nos laboratórios da ALS Analysis, conforme metodologia interna não divulgada.

No presente trabalho, foram utilizados os resultados dessas análises químicas já disponibilizadas pela universidade, referentes a amostras provenientes do mesmo perfil e horizontes das amostras coletadas por nossa equipe. As análises realizadas pela UNICAMP empregaram a técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), método adequado para determinar concentrações de elementos químicos e de terras raras (TR), (Thomas, 2013), em níveis de traço (Houk et al., 1980).

O ICP-MS consiste na introdução de uma solução nebulizada em um plasma de argônio de alta temperatura, onde os elementos presentes são ionizados (Jarvis et al., 1992), no equipamento mostrado na figura 11. Em seguida, os íons são separados e detectados conforme sua razão massa/carga, permitindo a identificação e quantificação precisa de diversos elementos presentes nas amostras.

**Figura 11:** Equipamento para ICP



**Fonte:** csaeducaciona

### 3.5 MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO COM CONTADOR GEIGER

As medições foram realizadas utilizando um contador Geiger-Müller, com o objetivo de determinar a taxa de contagem por minuto (CPM) de cada amostra analisada (Knoll, 2010). O procedimento seguiu uma metodologia padronizada para garantir a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos (ABNT NBR 10011).

O contador Geiger foi posicionado de forma fixa, mantendo uma distância constante entre o detector e cada amostra. Antes do início das medições, o equipamento foi ligado e deixado estabilizar por 1 minuto, com isso assegurando leituras consistentes.

Para cada amostra na Figura 12, realizou-se o seguinte procedimento:

**Figura 12:** Separação das amostras



**Fonte:** Dos autores

1. Tempo de medição: Cada medição teve duração total de 2 minutos (120 segundos).
2. Intervalo de registro: Ao longo dos 120 segundos, foram anotados valores de contagem a cada 10 segundos, resultando em 12 valores individuais por medição.



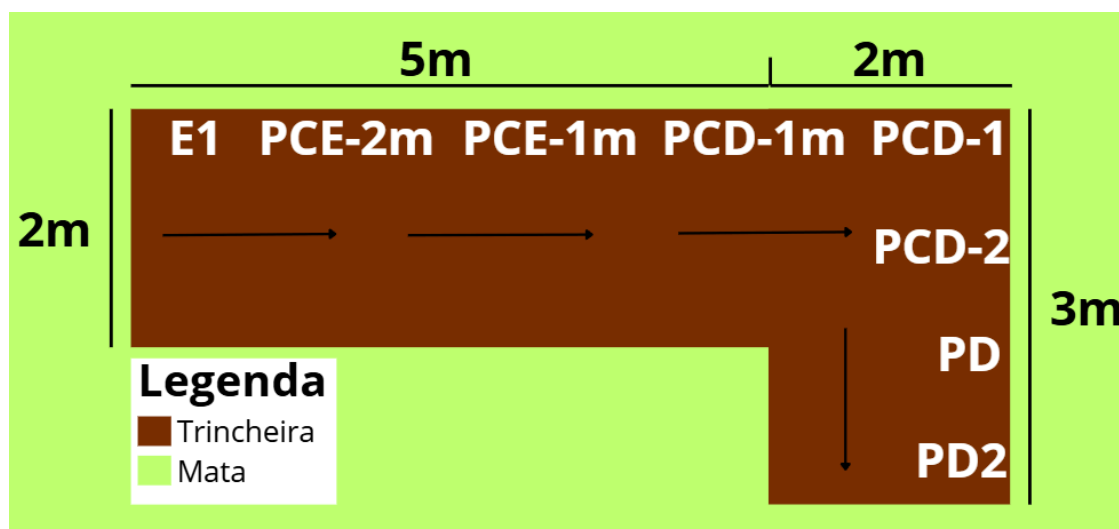
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área estudada localiza-se no setor oriental do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, onde foi aberta uma trincheira destinada à exposição integral do perfil de intemperismo. A trincheira possuía aproximadamente 7 metros de comprimento e 2 metros de largura, apresentando profundidade variável ao longo de sua extensão: iniciava com cerca de 150 cm e atingia 230 cm na extremidade final. Além disso, havia uma curva perpendicular à direita, com cerca de 3 metros de comprimento, mantendo características semelhantes às observadas nos níveis mais profundos da porção principal. Essa configuração permitiu visualizar não apenas a evolução vertical dos horizontes, mas também a continuidade lateral do perfil.

Durante a escavação, foi observada elevada umidade nas regiões profundas, resultando em acúmulo de lama no fundo da trincheira. Esse material, altamente plástico e aderente, dificultava o acesso e o manuseio das ferramentas, evidenciando a forte capacidade de retenção hídrica dos argilominerais presentes. A combinação entre saturação, granulometria fina e ausência de estruturas coesas favoreceu ainda a ocorrência de pequenos desbarrancamentos nas paredes laterais, indicando a baixa estabilidade do material inconsolidado nos horizontes inferiores. Tais observações de campo antecipam e corroboram os resultados laboratoriais relacionados à umidade, capacidade de troca catiônica e composição mineralógica.

A distinção dos horizontes pedológicos foi realizada com base em mudanças na cor, textura, teor de finos e presença de materiais residuais do protólito alcalino. Na Figura 14 é apresentada a divisão geral dos perfis ao longo da trincheira por meio de um croqui, enquanto a Figura 7 exhibe a delimitação dos horizontes A, B1, B2, B3, Transição, C1, C2 e C3 identificados em campo. Essas informações constituem a base estratigráfica utilizada para a interpretação dos resultados apresentados nas subseções seguintes.

**Figura 14** – Divisão geral dos perfis



Fonte: Dos Autores

#### 4.1 UMIDADE DAS AMOSTRAS

Como dito anteriormente, as amostras foram submetidas a uma estufa aquecida a 105 °C durante 24 horas, com o objetivo de promover a perda controlada da umidade presente. A seguir, apresenta-se a listagem das amostras com os respectivos pesos de aproximadamente um quilograma separados da amostra total na condição úmida, e sua condição seca após o tempo em estufa, respectivamente representadas como Tabela 2 e Tabela 3:

Tabela 2 - Massa Úmida

Amostra	Peso (g)
A	1000,5
B1	1000,5
B2	1000,8
B3	1000,4
TRANSIÇÃO	1000,2
C1	1000,4
C2	1000,2
C3	1000,9

Fonte: Dos autores

Tabela 3 - Massa Seca

Amostra	Peso (g)
A	760,7
B1	744,8
B2	722
B3	723,3
TRANSIÇÃO	682,5
C1	669
C2	668,5
C3	685,4

Fonte: Dos autores

#### 4.1.1 Cálculo da umidade gravimétrica

A determinação e o controle da umidade são vitais na caracterização de argilas, pois a água interage diretamente com a estrutura dos argilominerais, alterando propriedades físicas fundamentais como plasticidade, consistência e expansibilidade (PINTO, 2006).

Para o cálculo da umidade gravimétrica, utilizou-se a Equação 1 a seguir para encontrar os resultados da Tabela 4:

$$W (\%) = [(Massa do solo úmido - Massa do solo seco) / Massa do solo seco] \times 100$$

(EQUAÇÃO 1)

Tabela 4 - Umidade Gravimétrica

Amostra	Umidade Gravimétrica (%)
A	31,52
B1	34,33
B2	38,61
B3	38,31
TRANSIÇÃO	46,55
C1	49,54
C2	49,62
C3	46,03

Fonte: Dos autores

Os resultados obtidos na Tabela 4 para a determinação da umidade das amostras de argilas iônicas apresentaram valores entre 31,52% e 49,62%, com média de 41,81% e desvio padrão de 7,02%. Essa amplitude evidencia a heterogeneidade natural do depósito ao longo do perfil intempérico, indicando variações na compactação e na textura dos horizontes analisados.

A elevada umidade média observada não representa apenas a presença de água livre, mas sugere uma alta afinidade físico-química entre a água e a superfície dos argilominerais. Em argilas, esse teor de umidade está frequentemente associado a uma elevada área superficial específica e à presença de microporosidade, onde a água fica retida por forças capilares e de adsorção. Esse comportamento é típico de materiais com granulometria muito fina e com minerais que desenvolvem significativa interação elétrica com as moléculas de água (SOUZA SANTOS, 1992).

Além disso, a variabilidade evidenciada pelo desvio padrão de 7,02% aponta para mudanças na capacidade de retenção de água entre os horizontes. Isso reflete diferenças na mineralogia e na disponibilidade de sítios de troca iônica, uma vez que cátions adsorvidos na superfície das argilas tendem a hidratar-se, retendo água na estrutura (água adsorvida). O teor superior a 40% indica que o material, em seu estado natural, encontra-se em um estado de consistência plástica, o que influencia diretamente seu comportamento reológico e geotécnico.

Portanto, essa capacidade de retenção hídrica é um parâmetro crítico que indicia não apenas a plasticidade, mas também o potencial do material para aplicações que exijam alta adsorção ou interação iônica.

## 4.2 CÁLCULO CTC

Para realização do CTC utilizou-se as medidas da Tabela 5:

Tabela 5 – Dados necessários para o teste de CTC

Peso da gota (g)	0,031
Concentração Azul de Metileno (g/L)	0,75
Volume da gota (cm <sup>3</sup> )	0,023
Peso amostra (g)	0,5

Fonte: Dos autores

Portanto, com base nesses dados da Tabela 5 foram realizados dois testes de CTC para cada amostra com objetivo de minimizar os erros. Encontrou-se estas medidas de gotas após a realização do teste, informados na Tabela 6:

Tabela 6 – Gotas necessárias para a Troca Catiônica

Amostra	Número de gotas para o 1º ensaio	Número de gotas para o 2º ensaio
A	28	30
B1	27	25
B2	33	32
B3	27	26
TRANSIÇÃO	40	40
C1	25	24
C2	20	21
C3	36	34

Fonte: Dos autores

Possuindo os valores de gotas necessárias para a saturação da reação de troca catiônica informadas na Tabela 6, pode-se calcular o volume de Azul de Metileno utilizado por meio da Equação 2 e posteriormente representá-los na Tabela 7.

Volume de Azul de Metileno = Volume da gota x Número de gotas (EQUAÇÃO 2)

Tabela 7 – Volume de Azul de Metileno

Amostra	Volume do 1º ensaio (cm³)	Volume do 2º ensaio (cm³)
A	0,651	0,698
B1	0,628	0,581
B2	0,767	0,744
B3	0,628	0,605
TRANSIÇÃO	0,930	0,930
C1	0,581	0,558
C2	0,465	0,488
C3	0,837	0,791

Fonte: Dos autores

E com os valores encontrados utilizou-se a Equação 3 para calcular a CTC de cada amostra, que estão representadas na Tabela 8:

$$CTC = (\text{Volume Azul de Metileno} \times \text{Concentração} \times 100) / \text{Massa amostra}$$

(EQUAÇÃO 3)

Tabela 8 – Capacidade de Troca Catiônica

Amostra	CTC do 1º ensaio (mEq/100g)	CTC do 2º ensaio (mEq/100g)	Média CTC (mEq/100g)	Desvio Padrão
A	3,29	3,53	3,41	0,17
B1	3,17	2,94	3,06	0,16
B2	3,88	3,76	3,82	0,08
B3	3,17	3,06	3,12	0,08
TRANSIÇÃO	4,7	4,7	4,7	0
C1	2,94	2,82	2,88	0,08
C2	2,35	2,47	2,41	0,08
C3	4,23	4	4,12	0,16
Média geral CTC (mEq/100g)			Desvio Padrão geral	

3,44	0,74
------	------

Fonte: Dos autores

A consolidação dos dados analíticos de todos os horizontes permitiu estabelecer uma média global de CTC para o perfil da ordem de 3,44 mEq/100g, associada a um desvio padrão de 0,74 mEq/100g. Em termos estatísticos, essa dispersão representa um coeficiente de variação de aproximadamente 21,5%, evidenciando que existe uma moderada heterogeneidade mineralógica vertical ao longo da trincheira, a qual reflete as diferentes intensidades dos processos pedogenéticos e de lixiviação atuantes no maciço.

Essa variabilidade observada não ocorre de maneira aleatória, mas segue a lógica das frentes de intemperismo do depósito. Enquanto a média global ratifica a predominância de uma mineralogia de baixa atividade coloidal, típica de argilas caulínicas, a análise detalhada demonstra que os valores superiores encontrados nos horizontes de Transição e C3 elevam a média geral e sinalizam a preservação de níveis estratigráficos com maior reatividade superficial e disponibilidade de sítios de troca.

Sob a perspectiva da pré-caracterização de argilas iônicas, essa distribuição de valores sugere um zoneamento geoquímico onde o depósito não é uniforme ao longo desse perfil. Desta forma, os horizontes que apresentam CTC acima da média global tendem a possuir maior capacidade de retenção de cátions metálicos, configurando-se como os alvos preferenciais para a concentração de terras raras adsorvidas e constituindo o foco prioritário para etapas subsequentes de avaliação de reservas e viabilidade econômica.

#### 4.3 RESULTADOS ANÁLISES QUÍMICAS

Este método permitiu quantificar individualmente elementos como La, Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu. Os resultados obtidos pelo laboratório forneceram as concentrações de terras raras em partes por milhão (ppm).

Com base nos resultados obtidos nos gráficos, foi possível realizar uma análise detalhada da distribuição dos diferentes grupos de terras raras ao longo do perfil estudado. Essa abordagem permitiu compreender como as Terras Raras Leves (LREE), Médias (MREE), Pesadas (HREE) e Totais (TREE) se comportam em cada horizonte, evidenciando tendências geoquímicas específicas associadas aos processos de intemperismo e à proximidade com o material de origem (Henderson, 1984).

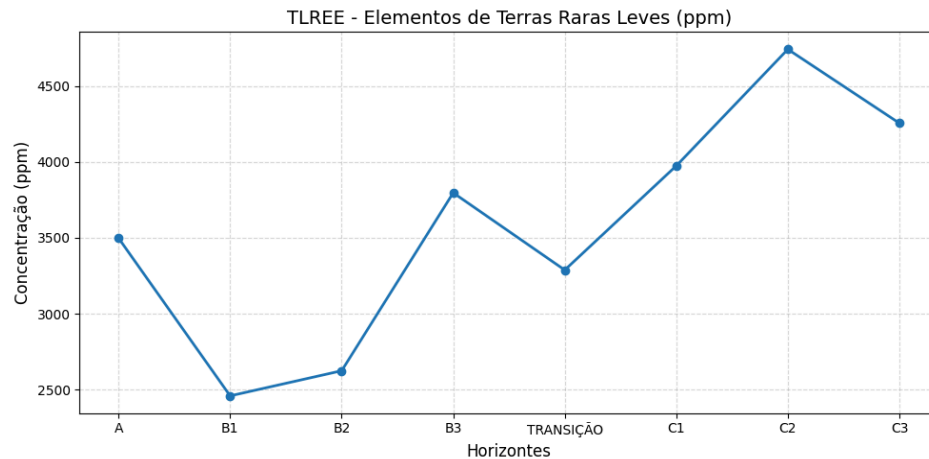
A análise da distribuição geoquímica vertical revela um comportamento bimodal complexo ao longo do perfil de intemperismo. Observa-se uma concentração elevada inicial no Horizonte A, atribuída à forte interação dos lantanídeos com a matéria orgânica e à formação de quelatos superficiais.

Logo abaixo, nos horizontes B1 e B2, nota-se uma queda expressiva nos teores, caracterizando esta zona como um horizonte de eluviação (lixiviação intensa), onde a percolação de águas pluviais mobilizou e removeu os íons de terras raras.

A partir do Horizonte B3, ocorre uma retomada das concentrações (pico de acumulação), seguida por teores médios na zona de transição e valores novamente elevados nos horizontes profundos (C1, C2 e C3). Este enriquecimento na base do perfil indica a eficiência dos argilominerais neoformados (caulinita/halloysita) em reter, por adsorção iônica, os elementos que foram lixiviados das zonas superiores.

De forma geral, como mostrado no gráfico 1, observa-se que as Terras Raras Leves (LREE) apresentam os maiores valores absolutos em todos os horizontes, constituindo a fração predominante da composição química do perfil. Os teores de LREE aumentam gradualmente em profundidade, com um crescimento mais expressivo a partir do horizonte C1.

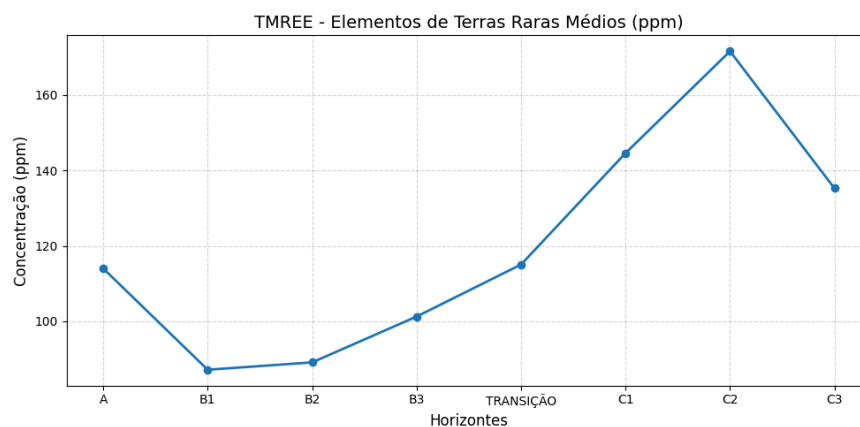
Gráfico 1 - PPM de elementos de terras raras leves



**Fonte:** Dos autores

As MREE, como visto no gráfico 2, também apresentam um aumento progressivo em profundidade, porém com variação menos acentuada do que a observada para as LREE. A distribuição relativamente homogênea entre os horizontes A, B e transição sugere que esses elementos possuem comportamento geoquímico intermediário, sofrendo mobilização moderada ao longo do perfil.

Gráfico 2 - PPM de elementos de terras raras médios

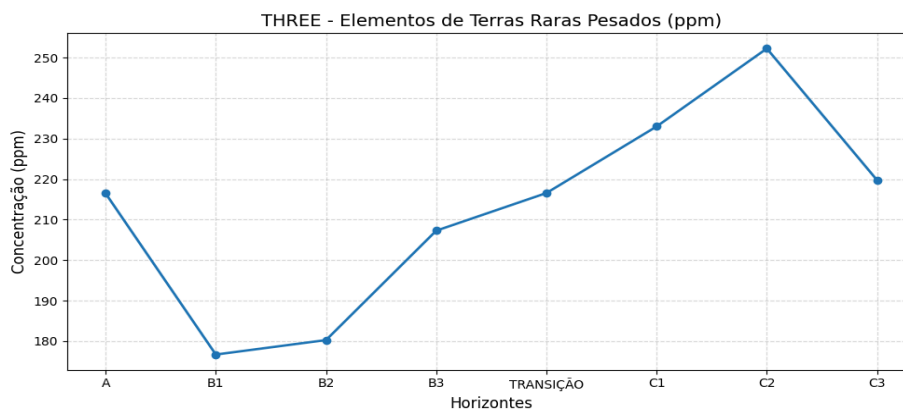


**Fonte:** Dos autores

No caso das HREE, os valores são menores em comparação aos demais grupos, mas demonstram tendência clara de aumento nos horizontes C, principalmente em C1 e C2, onde ocorrem os maiores teores. Esse comportamento

é compatível com a maior afinidade dos HREE por minerais resistentes ao intemperismo, que tendem a permanecer preservados em profundidade, como podemos ver no gráfico 3.

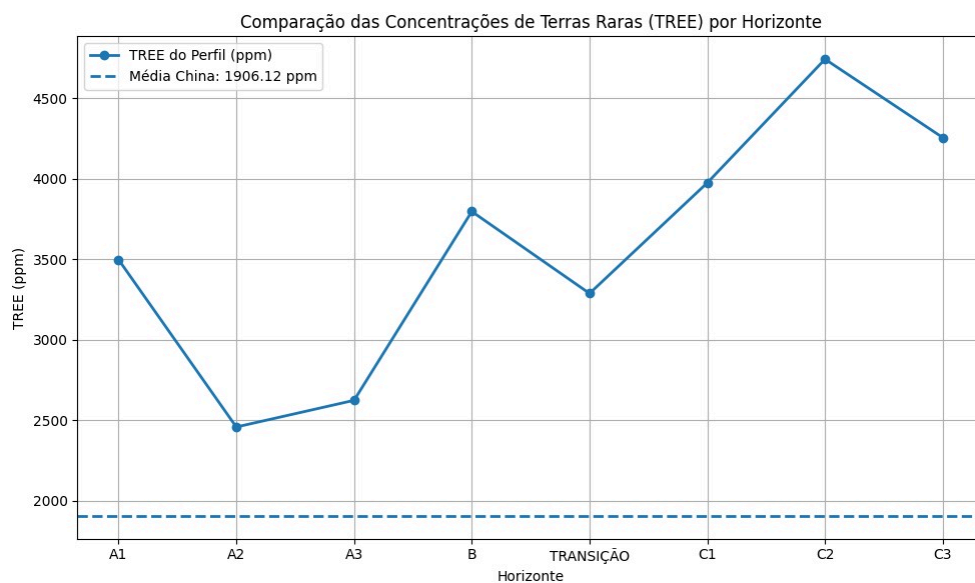
Gráfico 3 - PPM de elementos de terras raras pesadas



**Fonte:** Dos autores

Ao analisar os valores totais TREE, observa-se um padrão claro de incremento com a profundidade, atingindo o máximo no horizonte C2 (5167 ppm). Esse comportamento evidencia que a maior concentração de TR no perfil está associada aos horizontes mais profundos, reforçando que o material de origem exerce influência dominante na composição geoquímica, demonstrado no gráfico 4, além da alta concentração de terras raras se comparado com um depósito localizado na china (WANG, L.; LIANG, T 2016)

Gráfico 4 - PPM de elementos de terras raras totais

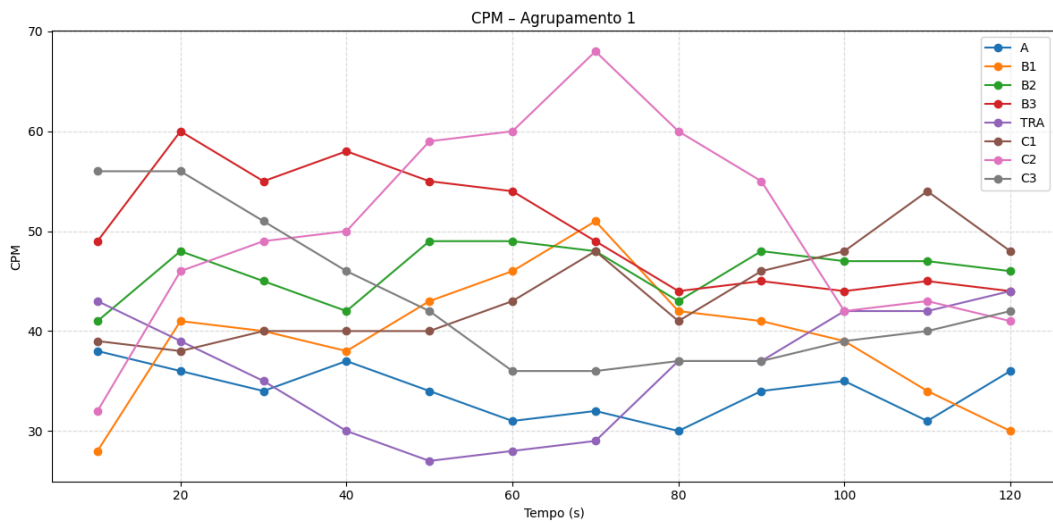


Fonte: Dos autores

#### 4.4 MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO COM CONTADOR GEIGER

As duas medições realizadas com o contador Geiger para as amostras de argila associada a depósitos de terras raras revelam diferenças consistentes entre os pontos analisados, refletindo a heterogeneidade natural do material. As amostras apresentam variações significativas tanto na média de contagem por minuto (CPM), quanto nos desvios. Essa variabilidade é esperada em argilas provenientes de ambientes ricos em elementos de terras raras, pois a concentração desses minerais não ocorre de forma uniforme no depósito.

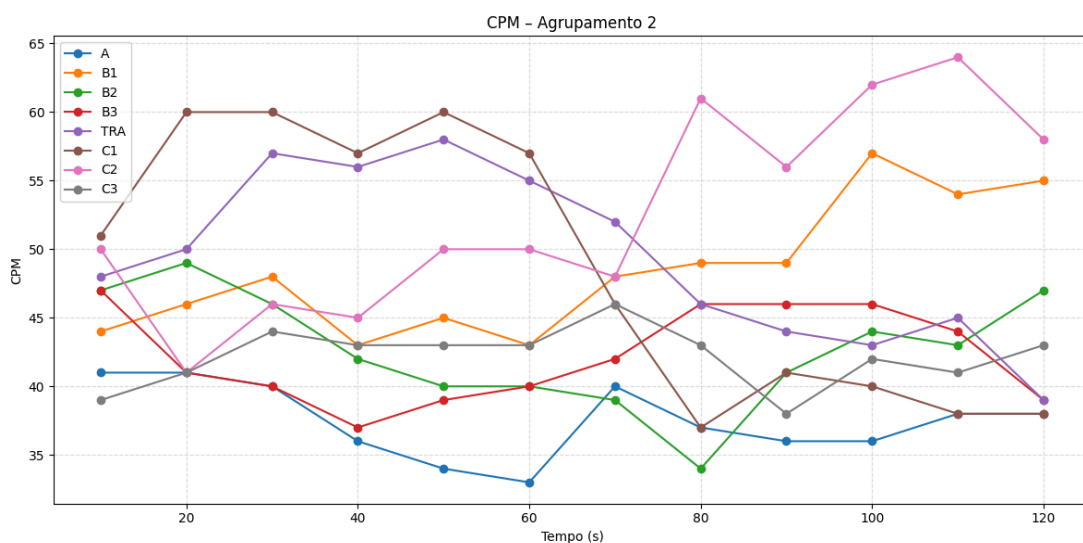
Gráfico 5 - Primeira Medição



Fonte: Dos autores

No primeiro experimento, gráfico 5, observa-se um conjunto de médias relativamente mais baixo em comparação ao segundo, embora o padrão geral de distribuição entre as amostras se mantenha. As diferenças entre as medições demonstram sensibilidade às pequenas mudanças de posicionamento, fator que influencia a leitura, como podemos ver no gráfico 6.

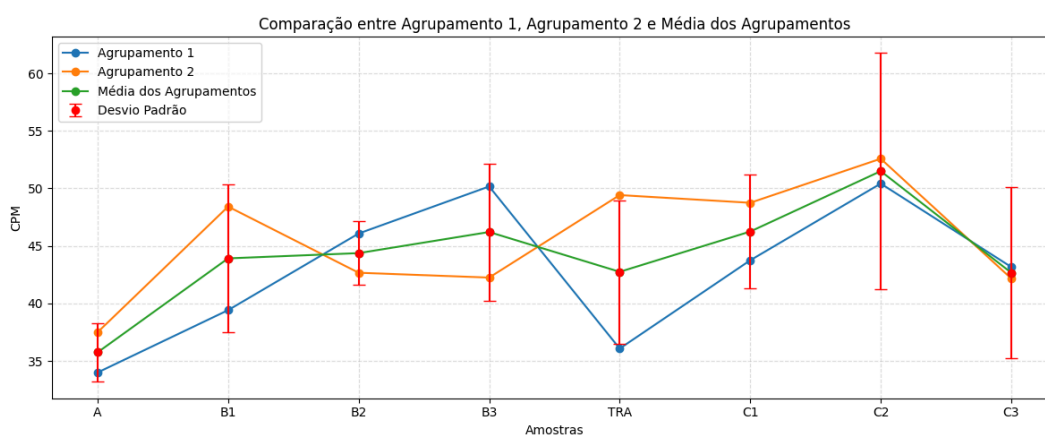
Gráfico 6 - Segunda Medição



Fonte: Dos autores

Amostras como C2 e C3 apresentaram valores médios mais elevados e maior desvio padrão, como mostrado no gráfico 7, sugerindo concentrações mais expressivas e irregulares de minerais que emitem radiação. Em contraste, amostras como A1 e B2 exibiram menores valores médios e menor variabilidade, indicando composição mais uniforme ou menor presença de minerais emissivos. A análise das médias combinadas reforça essas tendências, mostrando que os padrões de variabilidade persistem mesmo após a união estatística dos dois conjuntos de dados.

Gráfico 7 - Média combinada das medições



**Fonte:** Dos autores

Assim, a leitura conjunta dos valores confirma que as diferenças entre as amostras estão diretamente relacionadas à composição mineralógica da argila, cuja heterogeneidade interna influencia de modo decisivo a intensidade de radiação detectada. Importa destacar que os valores medidos não representam qualquer anomalia radiométrica fora do padrão esperado para o Complexo Alcalino de Poços de Caldas, uma região reconhecida por apresentar naturalmente níveis elevados de radioatividade devido à presença de urânio, tório e minerais associados (Schorscher; Shea, 1992; L'Annunziata, 2012).

Dessa forma, as leituras obtidas encontram-se dentro do comportamento radiométrico típico do maciço, confirmando que o material analisado reflete

condições naturais do substrato geológico. Além disso, esses resultados podem auxiliar futuramente em processos de licenciamento ambiental, uma vez que a identificação de radiação dentro dos limites naturais da região constitui parâmetro relevante para a avaliação de conformidade e segurança (Knoll, 2010).

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DA COR DE SOLO

A cor é um atributo morfológico essencial na pré-caracterização de depósitos de argilas, pois atua como um indicador visual direto da composição mineralógica, do teor de matéria orgânica e do estado de oxidação dos minerais de ferro ao longo do perfil de intemperismo.

Para a correta interpretação dos horizontes, relacionou-se a posição estratigráfica de cada amostra com sua classificação cromática. A Tabela 9 detalha as profundidades de coleta para cada horizonte e denomina sua notação e classificação de cor, enquanto a Figura 15 apresenta a paleta de cor dos horizontes, obtida através da carta *Munsell Soil Color Charts*.

TABELA 9 - Profundidade de amostragem e classificação de cor Munsell

Amostra / Horizonte	Profundidade (cm)	Notação Munsell (Seco)	Classificação de Cor (Munsell)
A	10	10YR 6/4	Light Yellowish Brown
B1	55	10YR 6/3	Pale Brown
B2	95	10YR 6/3	Pale Brown
B3	140	10YR 6/3	Pale Brown
TRANSIÇÃO	160	7.5YR 6/2	Pinkish Gray
C1	180	7.5YR 7/3	Pink
C2	210	7.5YR 7/3	Pink
C3	230	7.5YR 7/3	Pink

Fonte: Dos autores

**Figura 15** - Paleta de cores dos Horizontes

**Fonte:** Dos Autores

Para a interpretação do perfil estudado, a classificação foi realizada em amostras secas. Os resultados obtidos revelaram um comportamento cromático notavelmente homogêneo e de alta luminosidade ao longo de toda a profundidade da trincheira. Nos horizontes superficiais e intermediários, compreendendo as amostras A a B3 (de 0 a 140 cm), observou-se a predominância absoluta do Matiz 10YR com valores de luminosidade e croma estáveis (10YR 6/4 a 10YR 6/3), classificando o material como *Pale Brown*. A manutenção de valores de luminosidade altos nesta zona superior é um dado positivo, pois indica que o teor de matéria orgânica, embora presente, não é excessivo a ponto de mascarar a matriz mineral ou gerar complexos orgânicos.

À medida que se avança para o horizonte de Transição (160 cm), o perfil exhibe um ponto de inflexão geoquímica, evidenciado pela mudança da cor para *Pinkish Gray* (7.5YR 6/2). A alteração do matiz para 7.5YR, combinada com a redução da saturação, sugere a atuação de processos de lixiviação, onde a percolação de águas promove a remoção parcial dos pigmentos ferruginosos, expondo a coloração natural mais acinzentada dos argilominerais (RESENDE et al., 2014).

Nos horizontes C1, C2 e C3 que se estendem dos 180 cm até a base da amostragem, a coloração estabiliza-se em *Pink* (7.5YR 7/3). O aumento da

luminosidade para o Valor 7 nestas profundidades é o indicador mais relevante desta análise, pois confirma a predominância de uma matriz mineralógica composta essencialmente por argilas brancas, como a caulinita e a halloysita (SOUZA SANTOS, 1992), essa tonalidade rosada resulta da mistura óptica entre a brancura desses filossilicatos e óxidos de ferro. Cabe ressaltar, entretanto, que essa identificação é inferida com base em propriedades colorimétricas e no comportamento da CTC, carecendo ainda de confirmação mineralógica direta por meio de técnicas como DRX e MEV.

Em resumo, a ausência de colorações vermelhas intensas ou manchas escuras caracteriza este depósito como um manto de intemperismo maduro e lixiviado (KÄMPF; CURI, 2012). A homogeneidade das cores claras valida a existência de uma "rocha hospedeira" porosa, estável e com baixos teores de contaminantes, configurando um cenário mineralógico ideal para a adsorção e posterior recuperação de elementos de terras raras.

#### 4.6 CORRELAÇÃO ENTRE CTC E ANÁLISES QUÍMICAS

A análise cruzada entre os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e as concentrações de Terras Raras ao longo do perfil estratigráfico revela a ausência de uma correlação linear positiva constante, evidenciando a atuação de diferentes mecanismos de retenção mineralógica e geoquímica. A observação dos dados par a par permite identificar zonas com comportamentos antagônicos.

No Horizonte A, observa-se o primeiro descolamento entre as variáveis: uma concentração elevada de terras raras (3.828 ppm) ocorre em um meio com CTC baixa (3,41 meq/100g). Este enriquecimento superficial independe da capacidade de adsorção das argilas, sendo atribuído à quelatação dos metais pela matéria orgânica que atua como o principal agente fixador neste nível.

A sequência dos horizontes B1 e B2 reflete uma zona de empobrecimento, onde baixas concentrações de terras raras (2.722 e 2.893 ppm) coincidem com valores de CTC também modestos (3,06 e 3,82 meq/100g), caracterizando um ambiente de lixiviação ativa.

Contudo, ao atingir o Horizonte B3, ocorre uma anomalia significativa. A concentração de terras raras sofre um incremento abrupto para 4.106 ppm, enquanto a CTC permanece baixa (3,12 meq/100g). Imediatamente abaixo, no Horizonte de Transição, observa-se o inverso: a CTC atinge seu pico máximo no perfil (4,70 meq/100g), mas a concentração de terras raras recua para 3.620 ppm.

A evidência mais crítica da desconexão entre CTC e teor metálico encontra-se nos horizontes profundos, especificamente na passagem para C1 e C2. Nestes níveis, a CTC cai drasticamente, atingindo o mínimo absoluto do perfil no horizonte C2 (2,41 meq/100g). Paradoxalmente, é justamente no C2 que se registra o teor máximo global de terras raras (5.167 ppm). Esta correlação inversa abre hipótese que a mineralização de alto teor na base do perfil não está adsorvida na fração argila.

A convergência dos parâmetros ocorre apenas na base da trincheira, no Horizonte C3, onde a CTC volta a subir (4,12 meq/100g) acompanhada de altos teores de terras raras (4.611 ppm), indicando finalmente um ambiente misto onde a adsorção iônica volta a contribuir para a retenção do minério.

## 5 CONCLUSÃO

A caracterização tecnológica das argilas portadoras de ETR do perfil no Capão do Mel confirmou a presença de um manto de intemperismo maduro, composto por argilas de baixa atividade coloidal e com valores de CTC compatíveis com materiais aptos ao processo de adsorção iônica. As análises químicas indicaram enriquecimento progressivo de terras raras em profundidade, com destaque para o horizonte C2, evidenciando que parte da mineralização é controlada não apenas por mecanismos de troca superficial, mas também por fases residuais associadas ao protólito alcalino.

Entretanto, a identificação mineralógica apresentada baseia-se em inferências indiretas, sendo necessária confirmação por técnicas específicas que diferenciem caulinita, halloysita e possíveis minerais responsáveis pela retenção dos ETR. Assim, recomenda-se a realização de análises complementares (como DRX e MEV) e ensaios hidrometalúrgicos para avaliar os elementos. Esses passos são essenciais para determinar o potencial econômico do depósito e orientar futuros estudos de lavra e beneficiamento.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o número de amostras coletadas ao longo da mesma trincheira, de modo a aumentar a resolução vertical dos dados e aprimorar a compreensão da variação dos teores de terras raras ao longo do perfil. Além disso, é importante coletar amostras em outras trincheiras da área de estudo, permitindo comparações entre perfis e possibilitando identificar padrões espaciais de enriquecimento ou heterogeneidade no depósito.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Medidores e monitores portáteis de taxa de exposição de raios X e gama para uso em radioproteção**. NBR 10011. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização**. NBR 6457. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BORST, A. M. *et al.* Adsorption of rare earth elements in regolith-hosted clay deposits. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 4386, 2020.
- CHI, R.; TIAN, J. **Weathered crust elution-deposited rare earth ores**. New York: Nova Science Publishers, 2008.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Relatório de Avaliação Radiológica Ambiental da Unidade de Caldas (Poços de Caldas – MG)**. Rio de Janeiro: CNEN, 2014.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas**. Belo Horizonte: CPRM, 2021.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- GOUVÊA, A. D. V. *et al.* Terras raras: considerações sobre o Planalto de Poços de Caldas (MG) no novo cenário mundial. **Holos**, v. 4, p. 101–114, 2014.
- HOUK, R. S. *et al.* Inductively coupled plasma mass spectrometry. **Analytical Chemistry**, v. 52, n. 14, p. 2283–2289, 1980.
- INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Periodic table of the elements**. Research Triangle Park: IUPAC, 2021. Disponível em: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>. Acesso em: 2025.
- JARVIS, K. E. **Modern ICP-MS analysis in geochemistry**. New York: Wiley, 2021.
- JARVIS, K. E.; GRAY, A. L.; HOUK, R. S. **Handbook of inductively coupled plasma mass spectrometry**. New York: Springer, 1992.
- KÄMPF, N.; CURI, N. **Formação e evolução dos solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2012.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2010.

L'ANNUNZIATA, M. F. **Handbook of radioactivity analysis**. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2012.

MUNSELL COLOR. **Munsell soil color charts**. Grand Rapids: Munsell Color, 2018.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras: UFLA, 2014.

ROCHA, A. M. *et al.* Weathering profile characterization and REE redistribution in tropical soils. **Geoderma**, v. 161, n. 1, p. 73–81, 2011.

SCHORSCHER, H. D.; SHEA, M. E. **The Poços de Caldas alkaline complex, Brazil**. In: FITTON, J. G.; UPTON, B. G. J. (eds.). **Alkaline igneous rocks**. London: Geological Society of London, 1987. p. 367–384.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

THOMAS, R. **Practical guide to ICP-MS**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

ULBRICH, H. H. G. J. *et al.* Alkaline magmatism in southeastern Brazil: the Poços de Caldas alkaline complex. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 15, n. 2, p. 189–205, 2002.

WANG, L.; LIANG, T. Rare earth element resources in China. **Applied Geochemistry**, v. 72, p. 1–11, 2016.