



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DE SOLOS DO SINCLINAL DOM BOSCO COM  
DESTAQUE PARA OCORRÊNCIAS DO TIPO “BORRA DE CAFÉ”

Ana Paula Chimini

**MONOGRAFIA nº 422**

Ouro Preto, Fevereiro de 2022



**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DE SOLOS DO  
SINCLINAL DOM BOSCO COM DESTAQUE PARA  
OCORRÊNCIAS DO TIPO “BORRA DE CAFÉ”**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. José Alberto Naves Cocota Júnior

#### *Vice-Diretor*

Prof. Cláudio Eduardo Lana

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Ms. Edison Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 422**

## **CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DE SOLOS DO SINCLINAL DOM BOSCO COM DESTAQUE PARA OCORRÊNCIAS DO TIPO “BORRA DE CAFÉ”**

**Ana Paula Chimini**

*Orientador*

**Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana**

*Co-Orientador*

**Dr. Leonardo Brandão Nogueira**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/1.

**OURO PRETO**

**2022**

---

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Ana Paula Chimini

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

#### SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C538c Chimini, Ana Paula.

Caracterização geoquímica de solos do Sinclinal Dom Bosco com destaque para ocorrências do tipo "borra de café". [manuscrito] / Ana Paula Chimini. - 2022.

84 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana.

Coorientador: Dr. Leonardo Brandão Nogueira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Pedologia. 2. Ciência do solo. 3. Solos - Análise. 4. Geoquímica. I. Lana, Cláudio Eduardo. II. Nogueira, Leonardo Brandão. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.4:631.4

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>

## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DE SOLOS DO SINCLINAL DOM BOSCO COM DESTAQUE PARA OCORRÊNCIAS DO TIPO “BORRA DE CAFÉ”

**AUTORA:** ANA PAULA CHIMINI

**ORIENTADOR:** CLÁUDIO EDUARDO LANA

**CO-ORIENTADOR:** LEONARDO BRANDÃO NOGUEIRA

**Aprovada em:** 08 de fevereiro de 2022

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Maria Eugênia Silva de Souza



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Adriana Trópia de Abreu

*Adriana Trópia de Abreu*

DEGEO/UFOP

**Ouro Preto, 08/02/2022**



## Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente aos meus pais e à minha irmã, por me fornecerem estrutura e incentivo no período em que estive na faculdade.

Agradeço ao meu noivo Wagner pelo apoio emocional e participações nos meus estudos. Além do constante e paciente amor e carinho.

Agradeço aos meus orientadores, Cláudio e Leonardo, pelo tempo, comprometimento e apoio dedicado no processo de realização deste trabalho.

Agradeço ao corpo docente e aos funcionários dos laboratórios que me proporcionaram as condições necessárias para que eu alcançasse meus objetivos.

Agradeço de forma especial a todos que, direta ou indiretamente, influenciaram em minha formação pessoal e profissional. A todos os amigos do curso e de Ouro Preto pela amizade - principalmente os amigos Pedro Silvestre (Dom Pepe), Rafael Viana (Jackson), Gustavo W., Gabriel Petarli, Camila Milli, Carol Gontijo, Matheus Castro (Max), Carlos Godoi (Cajú), Caio Seebregts e Mateus Honorato.

Por fim, sou imensamente grata ao Departamento de Geologia da Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto e à Fundação Gorceix, pelos ensinamentos e pelo curso superior de excelência que tive a satisfação em cursar.



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA.....	4
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
1.5.1 Revisão bibliográfica.....	6
1.5.2 Trabalho de Campo.....	7
1.5.3 Descrição Amostral.....	8
1.5.4 Trabalho Laboratorial.....	13
1.5.5 Discussão dos Resultados e Confecção da Monografia.....	15
<b>2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 RELEVO E HIDROGRAFIA.....	17
2.2 CLIMA.....	19
2.3 VEGETAÇÃO.....	20
2.4 SOLOS.....	20
2.5 ECONOMIA.....	21
<b>3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....</b>	<b>22</b>
3.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO.....	22
3.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO.....	24
3.2.1 Apresentação.....	24
3.2.2 Estratigrafia Local.....	24
3.2.2.1 Complexos do Embasamento.....	25
3.2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas.....	26
3.2.2.3 Supergrupo Minas.....	26
3.2.2.4 Supergrupo Estrada Real.....	28
3.2.2.5 Rochas Intrusivas Pós Minas.....	28

3.2.2.6 Coberturas Cenozoicas.....	28
3.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	29
<b>4 EMBASAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>31</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA REGIONAL.....	31
4.1.1 Supergrupo Rio das Velhas.....	31
4.1.2 Supergrupo Minas.....	32
4.1.3 Supergrupo Estrada Real.....	37
<b>5 RESULTADOS FÍSICOS.....</b>	<b>39</b>
5.1 APRESENTAÇÃO.....	39
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS.....	39
5.2.1 Disposição geral do solo “borra de café”.....	39
5.2.2 Coloração do solo “borra de café”.....	43
5.2.3 Classificação textural do solo “borra de café”.....	47
5.2.4 Classificação estrutural do solo “borra de café”.....	48
5.2.5 Consistência do solo “borra de café”.....	50
<b>6 RESULTADOS GEOQUÍMICOS.....</b>	<b>52</b>
6.1 APRESENTAÇÃO.....	52
6.2 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DAS AMOSTRAS.....	52
6.2.1 Comparação do comportamento dos diversos elementos entre si.....	52
6.2.2 Elementos Maiores, Menores e Traço.....	57
6.2.2.1 Concentrações de Zr, Th e Al.....	60
6.2.3 Elementos Terras Raras.....	62
6.2.3.1 Comportamento do Y e razão Y/Ho.....	68
6.2.3.2 Anomalia positiva de Ce.....	69
6.2.3.3 Anomalia levemente negativa de Pr.....	70
6.2.3.4 Anomalia levemente positiva de Eu.....	71
6.2.3.5 Anomalia levemente positiva de La.....	72
<b>7 DISCUSSÃO GERAL E CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>

## INDÍCE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Mapa de localização da área de estudo com destaque para seu posicionamento no Quadrilátero Ferrífero. Fonte: base de dados Quadrilátero Ferrífero 2050 de Endo <i>et al.</i> (2020).....	03
<b>Figura 1.2</b> - Fluxograma com as metodologias empregadas para o desenvolvimento do presente.....	05
<b>Figura 1.3</b> - Mapa com localização dos pontos visitados e amostrados ao longo do Sinclinal Dom Bosco. Fonte: Google Satellite, EPSG:31983 - SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S.....	07
<b>Figura 1.4</b> - Diagrama representando os três componentes da cor pelo sistema Munsell de Cores: matiz, valor e croma. Fonte: Rhyne (2015).....	08
<b>Figura 1.5</b> - Agregado de solo junto a Carta de Munsell durante a determinação da cor. Fonte: Andrade (2020).....	09
<b>Figura 1.6</b> - Classes texturais de solos e valores dos limites entre as frações granulométricas (Estados Unidos 1993).....	09
<b>Figura 1.7</b> - Representação esquemática das formas de agregados que pode apresentar a estrutura do solo. Fonte: Verzutti (2021).....	10
<b>Figura 1.8</b> - Ilustração da forma de classificação da consistência de algumas amostras de solo do presente trabalho quando o material se encontra molhado.....	12
<b>Figura 1.9</b> - Fluxograma de digestão total das amostras. Adaptado de Nogueira <i>et al.</i> (2019) e Nogueira (2018).....	14
<b>Figura 1.10</b> - Espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) – Agilent 725 à esquerda.....	14
<b>Figura 2.1</b> - Modelo digital de elevação em metros da região estudada. Realizado com o banco de dados GIS de Endo <i>et al.</i> (2020).....	18
<b>Figura 2.2</b> - Mapa com a disposição das bacias hidrográficas presentes na região de estudo destacada em vermelho. Realizado com o banco de dados GIS de Endo <i>et al.</i> (2020).....	19
<b>Figura 2.3</b> - Ilustração das médias climáticas e precipitação por mês da cidade de Ouro Preto. Fonte: tempoagora.com.br. Data de acesso: outubro de 2021.....	20
<b>Figura 3.1</b> - Mapa litoestrutural do Quadrilátero Ferrífero com destaque para sua disposição na extremidade sul do Cráton São Francisco.....	23
<b>Figura 3.2</b> - Mapa esquemático de articulação das Nappes Curral e Ouro Preto. Retirado de Endo <i>et al.</i> (2005).....	24
<b>Figura 3.3</b> - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero retirada de Endo <i>et al.</i> (2019b).....	25
<b>Figura 3.4</b> - Mapa litoestrutural da porção centro norte do Sinclinal Dom Bosco. Baseado no compilado de pesquisas desenvolvidas no Quadrilátero Ferrífero.....	30
<b>Figura 4.1</b> - Variação geoquímica (%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e %SiO <sub>2</sub> ), isotópica ( $\delta^{56}\text{Fe}$ ) e dos espectros de ETR+Y normalizados pelo Post Archean Australian Shale (PAAS).....	34
<b>Figura 4.2</b> - (a) Coluna estratigráfica da pedreira Bemil (Formação Gandarela), juntamente com as curvas isotópicas de carbono e oxigênio.....	35
<b>Figura 4.3</b> - (a) Coluna estratigráfica da pedreira Cumbi (Formação Fecho do Funil), juntamente com as curvas isotópicas de carbono e oxigênio.....	37
<b>Figura 5.1</b> - Mapa com localização dos pontos visitados e amostrados ao longo do Sinclinal Dom Bosco que foram classificados como solos “borra de café”.....	41

<b>Figura 5.2</b> - Ilustração do solo “borra de café” <i>in situ</i> ao longo do Sinclinal Dom Bosco. A-P02, B-P05, C-P09, D-P10, E-P11, F-P44, G-P48, H-P51, I-P64, J-PA3.....	42
<b>Figura 5.3</b> - Disposição de perfis pedológicos em que se observa no topo a presença do solo “borra de café” e na base um material parental.....	42
<b>Figura 5.4</b> - Ilustração simplificada das informações de Matiz, Valor e Cromo presentes na classificação da coloração dos solos amostrados definidos como sendo do tipo “borra de café”.....	46
<b>Figura 5.5</b> - Ilustração retirada da Carta de Munsell destacando classificação de solos que mais representa a coloração dos solos “borra de café” (7.5YR 3/4).....	47
<b>Figura 5.6</b> - Ilustração retirada do Soil Survey Manual (Estados Unidos 1993) destacando a classificação textural que mais representa a coloração.....	48
<b>Figura 5.7</b> - Ilustração do modo de ocorrência das formas estruturais existentes no solo “borra de café”. Os desenhos evidenciam suas características essenciais .....	50
<b>Figura 6.1</b> - Ilustração da distribuição das concentrações de elementos maiores e menores ao longo das amostras nos pontos de interesse levantados como sendo de solo.....	57
<b>Figura 6.2</b> - Gráficos com correlações lineares listadas entre os elementos maiores, menores e traço de maior interesse analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café”.....	59
<b>Figura 6.3</b> - Ilustração da distribuição das concentrações de Zr, Th e Al ao longo das amostras nos pontos de interesse levantados como sendo de solo “borra de café”.....	61
<b>Figura 6.4</b> - Gráficos com correlações lineares positivas entre o $\sum$ ETR e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo.....	62
<b>Figura 6.5</b> - Diagrama de ETR + Y com dados normalizados pela composição do <i>Post-Archean Australian Shale</i> (PAAS) para as 10 amostras descritas macroscopicamente.....	66
<b>Figura 6.6</b> - Diagrama de ETR + Y com dados normalizados pela composição do <i>Post-Archean Australian Shale</i> (PAAS) ilustrando o comportamento de solos .....	67
<b>Figura 6.7</b> - Gráficos com correlação linear positiva entre Ce e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” .....	70
<b>Figura 6.8</b> - Gráficos com correlação linear positiva entre Pr e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” .....	71
<b>Figura 6.9</b> - Gráficos com correlação linear positiva entre Eu e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” .....	72
<b>Figura 6.10</b> - Gráficos com correlação linear positiva entre La e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café”.....	73

## ÍNDICE DE TABELAS

---

<b>Tabela 1.1</b> - Tipos e classes de estruturas de solos. Baseado em Santos <i>et al.</i> (2005).....	10
<b>Tabela 1.2</b> - Consistência de solos segundo três estados de umidade padronizado: seco, úmido e molhado. Baseado em Santos <i>et al.</i> (2005).....	11
<b>Tabela 5.1</b> - Amostras classificadas como solo “borra de café”. Destaque para posicionamento em zonas de drenagem e para o tipo de litologia aflorante no local (material parental).....	40
<b>Tabela 5.2</b> - Nomeação da coloração das amostras classificadas como solo “borra de café” com base na Carta de Munsell. Destaque para a semelhança entre as nuances.....	44
<b>Tabela 5.3</b> - Classificação textural das amostras identificadas como solo “borra de café”.....	48
<b>Tabela 6.1</b> - Análise estatística descritiva dos elementos químicos encontrados nas 10 amostras de solos classificados como sendo de “borra de café”.....	54
<b>Tabela 6.2</b> - Análise de correlação ( $\rho$ de Pearson) calculado entre os elementos químicos do solo “borra de café” obtidos por meio de ICP-OES e ICP-MS.....	56
<b>Tabela 6.3</b> - Concentração de elementos maiores, menores e traço (em mg/kg) correlacionados com pontos amostrados detentores de solos carbonatados do tipo “borra de café”.....	58
<b>Tabela 6.4</b> - Concentração de elementos terras raras (mg/kg) não normalizados encontrados nos pontos amostrados detentores de solos carbonatados do tipo “borra de café”.....	64
<b>Tabela 6.5</b> - Concentração de elementos terras raras (mg/kg) nos pontos amostrados detentores de solos carbonatados do tipo “borra de café”. .....	65



## Resumo

---

O Sinclinal Dom Bosco é uma importante estrutura da porção sul da mundialmente conhecida província mineral Quadrilátero Ferrífero. As rochas carbonáticas aflorantes na região apresentam intensos processos erosivos e intempéricos responsáveis pela formulação de um material de aspecto argiloso e de cor marrom escura ou preta, bastante fértil, citado nos trabalhos de Olsen (1971) e de Gandini (1994), respectivamente, como *brown terrena* e “borra de café”. As vagas menções na literatura descrevem as rochas carbonáticas aflorantes na região como seu material parental, mas pouco se aprofundam em aspectos composicionais e evolutivos, impressos em suas características geoquímicas, ou mesmo em questões físicas elementares como seu enquadramento preciso em relação à carta com o sistema de cores de Munsell. Destaca-se, então, a existência de uma grande lacuna de informações sobre os solos “borra de café” na literatura acadêmica. Sabendo-se da complexidade de identificação e carência de estudos desse domínio pedológico, realizou-se um estudo exploratório em níveis superficiais no formato de Trabalho de Conclusão de Curso, especificamente nas regiões em que afloram rochas reconhecidamente relacionadas a esses solos. Pretendeu-se verificar em que condições específicas eles adquiriram o aspecto visual característico da “borra de café” e sua relação com determinados materiais parentais. Para isso, coletou-se 31 amostras ao longo das unidades carbonáticas do Sinclinal Dom Bosco que foram submetidas a estudos descritivos pedológicos e geoquímicos (de elementos maiores, menores e traço, incluindo os ETR). Os resultados geoquímicos foram obtidos por meio de análises no ICP-OES (Agilent 725), buscando a determinação das concentrações dos elementos maiores e menores, enquanto que as concentrações dos elementos traço, incluindo os ETR foram realizadas no ICP-MS (Agilent 7700x). O perfil geoquímico de ETR + Y do solo “borra de café”, normalizado pelo PAAS, demonstra um enriquecimento dos ETR pesados em relação aos leves, mesmo que mais suave do que o observado nas rochas carbonáticas e itabiríticas. As razões de  $(La/Yb)_N$ ,  $(Nd/Yb)_N$  e  $(Pr/Yb)_N$  majoritariamente negativas confirmam esse comportamento. Ademais, apresenta anomalias positivas de Eu e de Y (razão Y/Ho) bem expressivas. No que diz respeito às anomalias de Ce, elas se mostram expressivamente mais positivas, diferentes das negativas encontradas nos carbonatos da Formação Gandarela. Confirma-se também uma origem terrígena para os ETR encontrada através de correlações positivas existentes entre o  $\Sigma ETR$ , Ce e Eu com elementos detríticos Al, Th e Zr. Por fim, desconsidera-se litotipos de uma formação geológica apenas como fonte dos materiais parentais (saprólitos) para esses solos.

**Palavras chave:** solo “borra de café”, classificações geoquímica e pedológica, Sinclinal Dom Bosco.



# CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O Sinclinal Dom Bosco é uma importante estrutura da porção sul da mundialmente conhecida província mineral Quadrilátero Ferrífero. As rochas carbonáticas aflorantes na região apresentam intensos processos erosivos e intempéricos responsáveis pela gênese de um material de aspecto argiloso e de cor marrom escura ou preta, bastante fértil, citado nos trabalhos de Olsen (1971) e de Gandini (1994), respectivamente, como brown terrena e “borra de café”. Esse produto intempérico dolomítico oriundo de litotipos dos Grupos Itabira (Formação Gandarela) e Piracicaba (Formações Fecho do Funil e Cercadinho) é formado por caulinita, carbonatos e óxidos de ferro e de manganês totalmente decompostos, resguardando significativas mineralizações de topázio imperial, além de concentrações variáveis de minerais como especularita, barita, rutilo e florencita.

As vagas menções na literatura descrevem as rochas carbonáticas aflorantes na região como material parental desse solo “borra de café”, mas pouco se aprofundam em aspectos composicionais e evolutivos, impressos em suas características geoquímicas, ou mesmo em questões elementares como seu enquadramento preciso em relação à carta com o sistema de cores de Munsell. Destaca-se, então, uma grande lacuna de informações sobre solos “borra de café” na literatura acadêmica. Assim, demonstra-se pertinente do ponto de vista exploratório uma caracterização geoquímica desses solos e uma diferenciação entre eles e outras coberturas geneticamente correlatas, potencializando a qualidade das classificações realizadas em campo, bem como o entendimento da relação entre os diferentes solos escuros e suas rochas-mãe, uma vez que essa relação parental entre a rocha alterada e o material superficial a ser estudado é incerta.

Sabendo-se da complexidade de identificação e carência de estudos desse domínio pedológico, propõe-se a realização de um estudo geoquímico exploratório em níveis superficiais ao longo do Sinclinal Dom Bosco no formato de Trabalho de Conclusão de Curso, especificamente nas regiões em que afloram rochas reconhecidamente relacionadas aos solos “borra de café”.

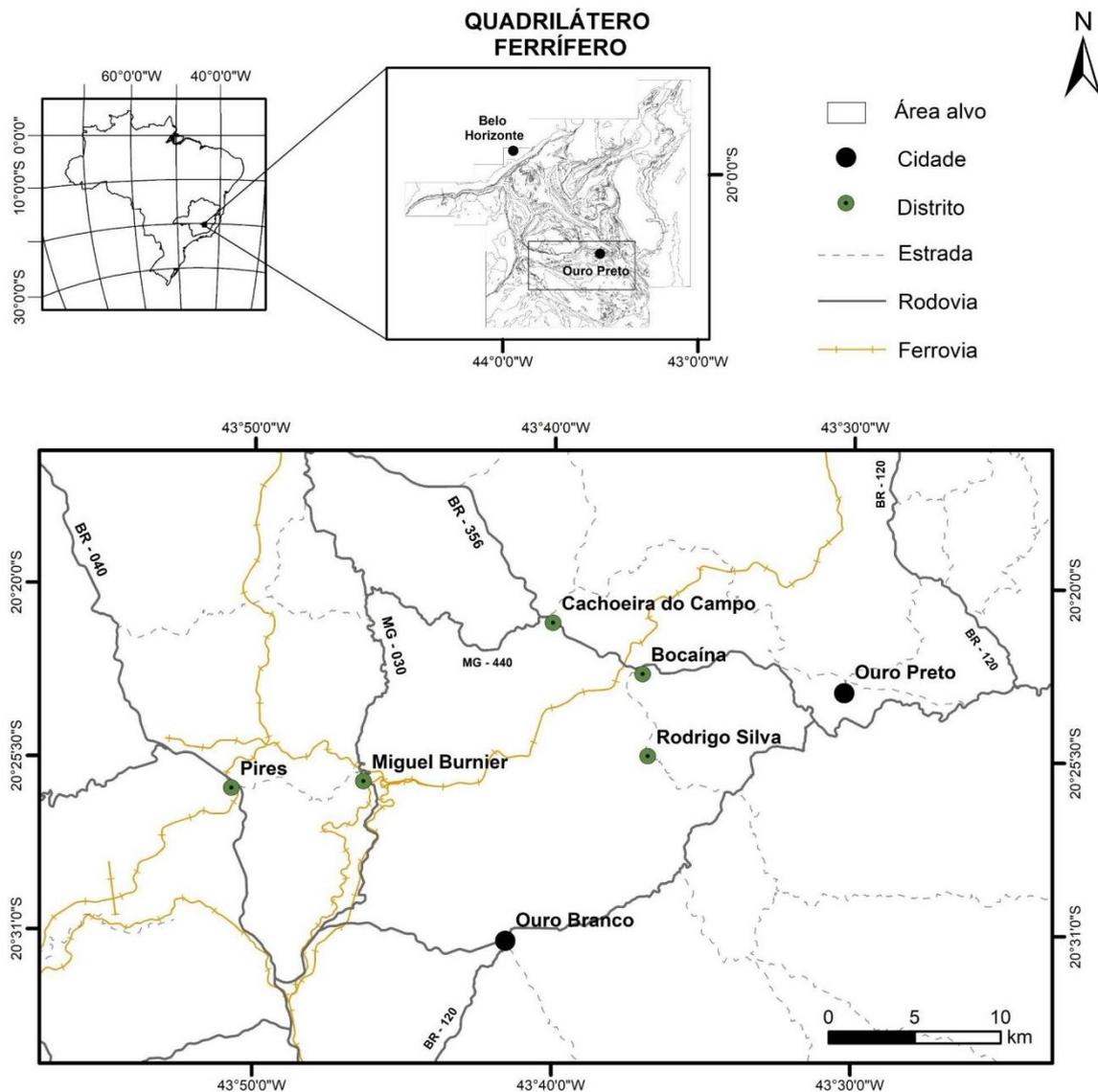
Diante do que foi apresentado acima e da determinação pormenorizada da composição química desses solos, pretende-se verificar em que condições específicas esses solos adquirem ou não o aspecto visual característico da “borra de café” e sua relação com determinados materiais parentais.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo encontra-se na região centro sul do estado de Minas Gerais, no interior da província mineral Quadrilátero Ferrífero, englobando Cachoeira do Campo a norte, Pires e Miguel Burnier a oeste e Rodrigo Silva a sudeste, distritos de Ouro Preto cuja sede está a leste da porção estudada.

Desde o município de Ouro Preto, o acesso é feito por via terrestre pela Rodovia dos Inconfidentes (BR-356) por 10 km em sentido oeste, até o Viaduto do Funil, tomando-se a esquerda uma estrada vicinal atrás da Mineradora Bemil em sentido sul por cerca de 2 km até se alcançar as proximidades do Córrego Caxeta. A partir dele, deslocou-se sentido norte em estrada asfaltada, regressando novamente para a Rodovia BR-356 até chegar no distrito de Bocaina, de onde locomoveu-se 6 km em sentido sul até alcançar o núcleo de Rodrigo Silva. Deste distrito, percorreu-se cerca de 24 km sentido oeste (rumo a MG-030) até o distrito de Miguel Burnier, nas proximidades da Gerdau Mineração, de onde continuou-se sentido oeste agora rumo a BR-040 por cerca de 12 km até se alcançar o distrito de Pires. Deste ponto, regressou-se para Miguel Burnier, de onde percorreu-se sentido norte por 10 km através da rodovia MG-030, alcançando o distrito de Engenheiro Corrêa, de onde tomou-se a direita por cerca de 15 km em sentido leste, passando pelo distrito de Santo Antônio do Leite até atingir o distrito de Cachoeira do Campo.

Destaca-se ainda que os pontos de interesse foram alcançados por uma série de estradas vicinais nas proximidades desses distritos. A Figura 1.1 mostra o posicionamento geográfico da região de estudo distribuída em uma área de aproximadamente 500 km<sup>2</sup> e limitada pelos meridianos 43°55' e 43°30' W e pelos paralelos 20°30' e 20°15' S.



**Figura 1.1** - Mapa de localização da área de estudo com destaque para seu posicionamento no Quadrilátero Ferrífero. Fonte: base de dados Quadrilátero Ferrífero 2050 de Endo *et al.* (2020).

### 1.3 OBJETIVOS

A partir de domínios geológicos metacarbonatados dos Grupos Itabira (Formação Gandarela) e Piracicaba (Formações Fecho do Funil e Cercadinho) e também de suas alterações superficiais na forma de solos como o do tipo “borra de café”, buscou-se executar um estudo geoquímico exploratório ao longo do Sinclinal Dom Bosco, especificamente nas regiões em que afloram esses domínios geológicos e pedológicos.

Pretendeu-se, inicialmente, fazer uma avaliação dos solos em termos de seus aspectos físicos, ou seja, demonstrou-se pertinente estabelecer uma diferenciação preliminar entre os solos através de uma descrição macroscópica detalhada de seus padrões texturais e de cores, com intuito de eliminar

confusões nas classificações durante trabalhos de campo e para viabilizar a classificação dos resultados.

Na sequência, objetivou-se a verificação e a caracterização da composição química desses materiais carbonatados a partir de análises das amostras coletadas em campo. Essas análises geoquímicas foram realizadas para determinação da concentração de elementos maiores e menores, e também de elementos traço, incluindo os Elementos Terras Raras. Destaca-se que para as amostras detentoras de informações do saprólito e *solum* (base e topo), buscou-se observar a evolução geoquímica de sua base para o topo, ou seja, ao longo do perfil pedológico, visando a avaliação das eventuais perdas e ganhos ligados à evolução pedogenética.

Por fim, a partir disso, pretendeu-se analisar as relações entre diferentes solos escuros da região e seus respectivos materiais parentais, destacando-se presença e variações na concentração de elementos químicos. Toda essa determinação pormenorizada da composição química foi feita com intuito de verificar em que condições específicas esses solos adquirem ou não o aspecto visual característico da “borra de café”.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

O Sinclinal Dom Bosco apresenta significativos depósitos econômicos de ouro, ferro, manganês e topázio. Logo, o interesse pelos bens minerais já torna pertinentes investimentos em pesquisas que agreguem ao maior entendimento e detalhamento científico do contexto geológico da região. Destaca-se ainda como fator relevante para o desenvolvimento do trabalho a existência de uma grande lacuna de informações sobre solos “borra de café” na literatura, em especial na região proposta, visto sua proximidade de universidades com cursos de geologia (Universidade Federal de Minas Gerais e Universidade Federal de Ouro Preto) ou com departamentos de solos referência na área (Universidade Federal de Viçosa).

As rochas carbonáticas aflorantes na região são responsáveis pela gênese desse solo “borra de café”. Diante disso, seria interessante do ponto de vista exploratório analisar através de métodos científicos a relação entre estes solos escuros e suas rochas-mãe, uma vez que não existem estudos que expliquem essa relação parental. Ademais, com a falta de mapeamento da disposição do “borra de café” na região, supõe-se que alguns solos não chegaram a adquirir suas feições características e por isso não são facilmente identificados e mapeados. Assim, sem garantias que comprovem a similaridade geoquímica entre ocorrências desses solos escuros, este estudo exploratório se mostra necessário.

Apesar das históricas presenças de lavras de ouro e topázio imperial em ambos os flancos do Sinclinal Dom Bosco, a exploração de florencita com Elementos Terras Raras associados (aluminofosfato de cério) e de barita são desconhecidas (Gandini 1994). Segundo Kwitko-Ribeiro *et al.*

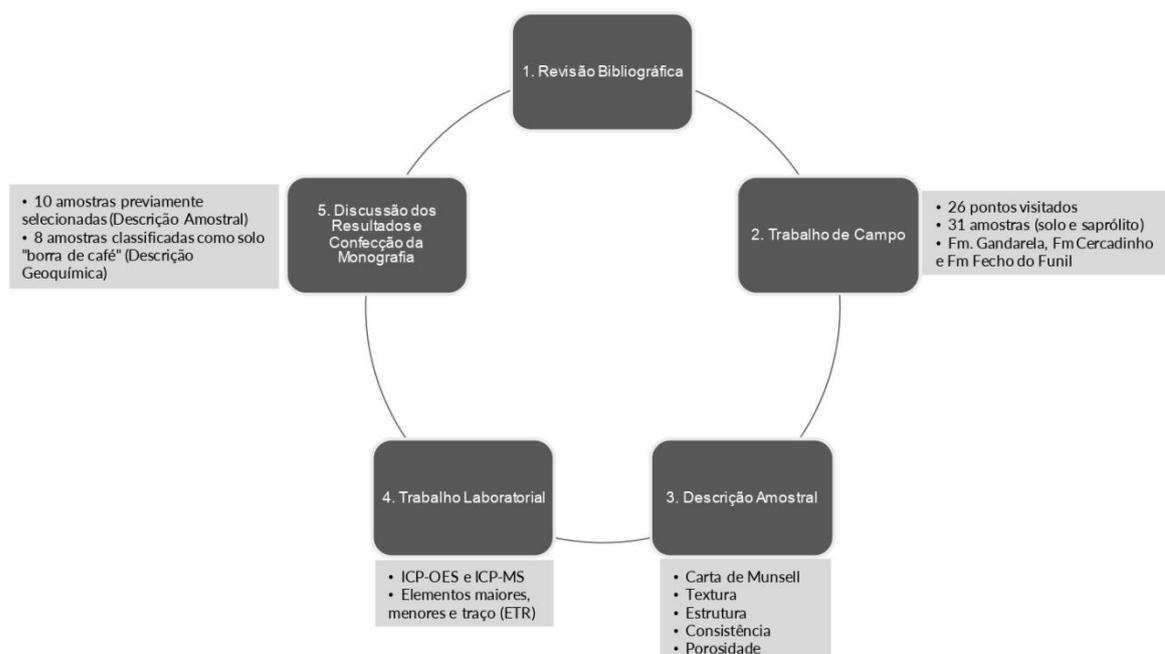
(2004), o topázio imperial ocorre em veios quartzosos hospedados em dolomitos alterados (“borra de café”) da Formação Gandarela, que consistem ainda de dolomita, florencita e rutilo, e encontram-se indiretamente associados também a mineralizações de ouro em veios hidrotermais (Gandini 1994).

Em um estudo para Centro de Estudos e Debates Estratégicos da Câmara dos Deputados, Martins *et al.* (2014) expõe que a maioria das ocorrências de minerais estratégicos detentores de Terras Raras ainda não foram mapeadas, nem tampouco desenvolvidas cadeias produtivas para sua exploração que envolve a produção de óxidos e ligas metálicas, insumos básicos na indústria tecnológica de ponta, como é o caso dos super-ímãs, essenciais na fabricação de turbinas eólicas e motores elétricos de menor tamanho e maior potência. Contudo, não existe vertentes de projetos científicos exploratórios para mapear a distribuição desses recursos nesse tipo de solo. Assim, o solo “borra de café” é muito mais do que um solo descritivo pouco ressaltado na pedologia. Ele representa um importante indicativo exploratório de áreas-alvo, por possuir minerais estratégicos a ele associados.

Em vista do exposto acima, este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta potencial de estabelecer um estudo geoquímico preliminar importante em face à escassez de pesquisas na região, bem como se constitui em uma oportunidade de validar as relações genéticas e caracterizar as ocorrências de solos “borra de café” encontradas em campo.

## 1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido entre os anos de 2020 e 2021, em diferentes etapas, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 1.2. Os itens descritos a seguir detalham cada etapa.



**Figura 1.2** - Fluxograma com as metodologias empregadas para o desenvolvimento do presente trabalho.

### 1.5.1 Revisão bibliográfica

Os trabalhos de revisão se iniciaram com levantamentos bibliográficos e cartográficos regionais do Quadrilátero Ferrífero e, posteriormente, consultas de trabalhos que enfatizaram os aspectos geológicos de sua porção sul, região do Sinclinal Dom Bosco, para entendimento dos contextos geológicos nos quais a área de estudo se insere.

Temáticas importantes para o projeto, bem como a evolução das mesmas na literatura também foram alvos de revisão bibliográfica. Propôs-se a identificação de trabalhos que abordam as relações químicas e mineralógicas de solos e rochas onde tenham sido descritos materiais superficiais escuros similares ao “borra de café”, independentemente de sua localização para melhor elucidar o contexto geológico em que se inserem. A principal base de consulta foi a tese de mestrado Gandini (1994) por possuir maior similaridade temática e por possuir os estudos mais abrangentes na região do Sinclinal Dom Bosco. Kwitko-Ribeiro *et al.* (2004) abordou o caráter indicativo exploratório dos solos “borra de café”, uma vez que descreve sua associação com recursos minerais estratégicos de grande valor econômico, como o topázio imperial, florencita (aluminofosfato de Ce), rutilo, barita e indiretamente mineralizações de ouro. Consultou-se também trabalhos como o de Lefebvre & Gasparrini (1980) e Araújo (2018).

Nesta etapa, optou-se também pela revisão e desenvolvimento de um acervo cartográfico com litotipos e solos da região de estudo. Utilizou-se o mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero versão 2019, em escala 1:150.000, revisado e atualizado pelo Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), juntamente com sua base de dados Quadrilátero Ferrífero 2050 de Endo *et al.* (2020). Ademais, consultou-se também bases de dados disponibilizadas pela CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais), como parte do projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero, em escala 1:50.000.

Por meio de convênios, a Universidade Federal de Viçosa (UFV), a Universidade Federal de Lavras (UFLA), o Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) e a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) realizaram trabalhos de amostragem e atualizaram a classificação dos solos mineiros para a versão mais recente do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA 2006), obtendo como produto final, em 2010, o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, na escala de 1:500.000, consultado também no presente trabalho.

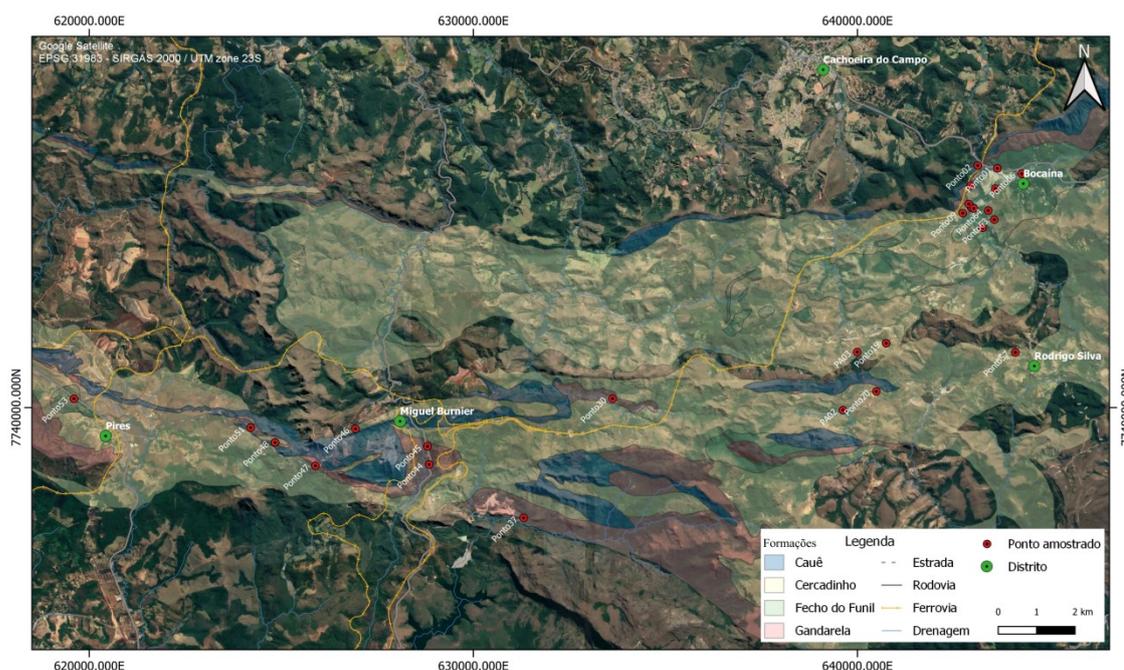
A integração dos dados geológicos foi realizada utilizando os softwares ArcGIS 10.3, QGIS 3.14.0, Google Earth Pro e Inkscape.

### 1.5.2 Trabalho de Campo

Após o estudo da base cartográfica desenvolvida na etapa anterior, definiu-se dentro da região alvo do presente trabalho uma malha amostral inicial de 70 pontos identificados como favoráveis dentro das unidades estratigráficas de interesse. Foram visitados durante o trabalho de campo 26 desses pontos em cortes de estrada de fácil acesso que podem ser visualizados na Figura 1.3, onde foram coletadas 31 amostras que foram processadas e analisadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto.

Nesta etapa, realizou-se a análise expedita em campo ao longo das unidades carbonáticas do Sinclinal Dom Bosco para evitar a coleta de materiais alóctones. Dessa forma, foram coletadas amostras no saprólito de interesse, nos horizontes do solum (preferencialmente o B) e, quando as condições eram favoráveis, também no horizonte C. Aproximadamente 1000 g de solo/saprólito foram coletadas, visando posteriores análises químicas. Todas as amostras coletadas foram etiquetadas, além de serem colocadas separadamente em sacos plásticos com identificação externa, para evitar a perda de informação.

O processo amostral em questão buscava elaborar uma evolução geoquímica do perfil pedológico do solo “borra de café” na região. Ademais, priorizou-se também a coleta de sedimentos aluviais em drenagens próximas de pontos de interesse, uma vez que com o resultado da análise geoquímica e avaliação de seu posicionamento, é possível analisar questões acerca da dispersão e/ou concentração de certos elementos químicos relacionados a esses tipos de solos escuros ao longo das micro bacias hidrográficas da região.



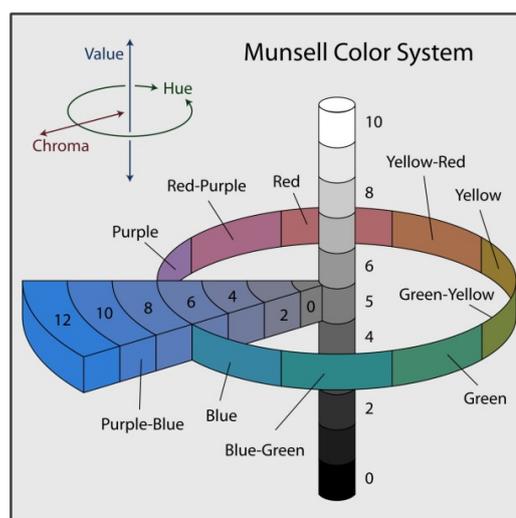
**Figura 1.3** - Mapa com localização dos pontos visitados e amostrados ao longo do Sinclinal Dom Bosco. Fonte: Google Satellite, EPSG:31983 - SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S.

A cada coleta, era realizada a limpeza e o “corte” dos perfis com auxílio de pás, facão e enxada. Realizando-se também a descrição pedológica simples *in situ* com a distinção entre os horizontes, levando-se em consideração sua composição, classificação e estruturação.

### 1.5.3 Descrição Amostral

Nesta etapa, buscou-se descrever as amostras de solos com base em suas características morfológicas, ou seja, aquelas observáveis através do tato e da visão. Sabe-se que a cor do solo fornece indicações referentes à sua composição química. No caso estudado, ela consiste em um parâmetro indicativo típico (cor da “borra de café”). A partir da cor, é possível fazer inferências quanto: conteúdo de matéria orgânica (MO) - em geral, quanto mais escura, maior o conteúdo de MO; tipificação de óxidos de ferro - hematita (cor vermelha), goethita (cor amarela), formas reduzidas de ferro (cores cinza); drenagem - em que cores neutras e acinzentadas indicam solos mal drenados, entre outros exemplos. Daí a importância de sua caracterização de forma padronizada.

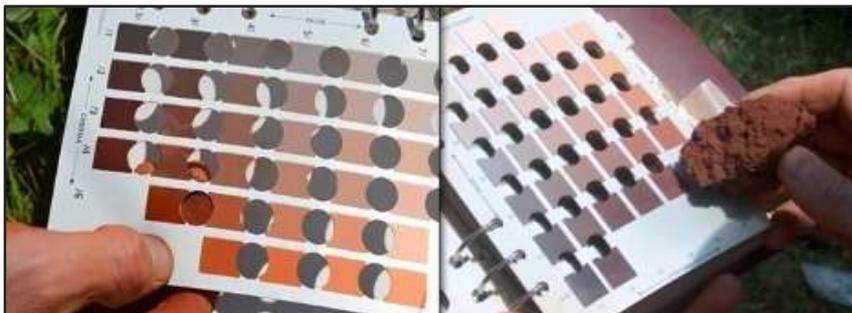
A identificação e classificação das cores das amostras foi feita com base na Carta de Munsell para Solos (“*Munsell Soil Color Charts*”), que consiste em um caderno com uma série de exemplos de cores relacionadas cada uma a um código de três números, representando: matiz, valor e croma (Figura 1.4). Matiz é o espectro dominante da cor: R-vermelho, Y-amarelo, G-verde, B-azul e P-púrpura. O valor corresponde ao brilho ou tonalidade da cor, combinando de branco ao preto em uma escala de 0 a 10. Quanto menor o valor, mais escura é a cor. Já o croma (escala de 0 a 8) ilustra a pureza relativa ou intensidade da cor. Logo, quanto mais alto o croma, mais viva é a cor.



**Figura 1.4** - Diagrama representando os três componentes da cor pelo sistema Munsell de Cores: matiz, valor e croma. Fonte: Rhyne (2015).

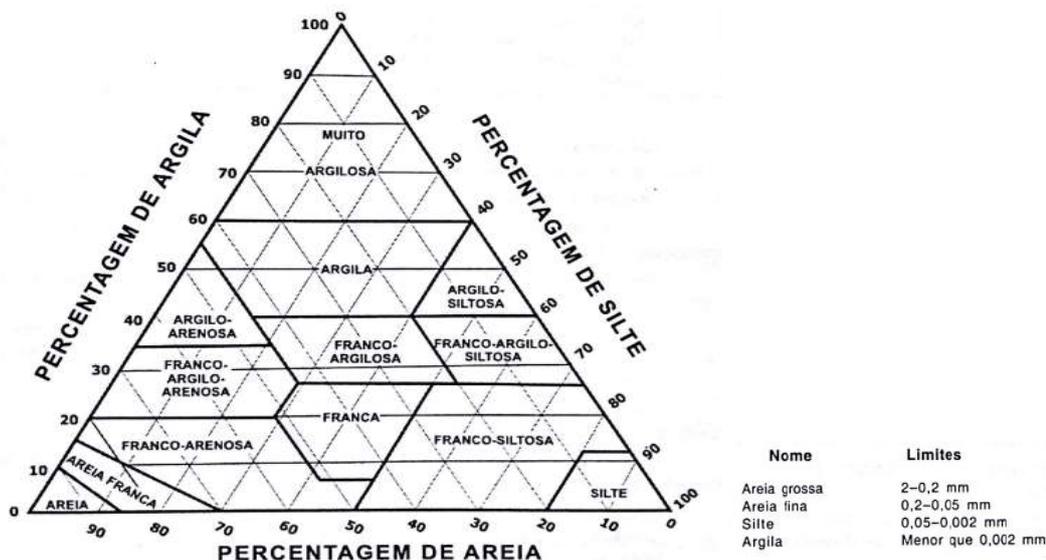
Diante disso, as cores foram determinadas de acordo com a semelhança das amostras com as pastilhas da carta, observando-se respectivamente, o matiz, seguido do valor e o croma (Figura 1.5).

As notações foram levantadas, bem como as demais características do material, como sua textura. Esta, refere-se à proporção relativa das frações granulométricas - areia (a mais grosseira), silte e argila (a mais fina) - que compõem a massa do solo (Santos *et al.* 2005). A descrição da granulometria das amostras foi obtida por meio de uma análise modal comparativa, utilizando-se cartela granulométrica e lupa com aumento de 10X.



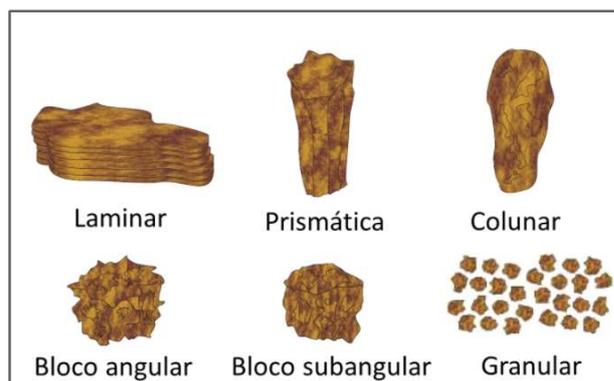
**Figura 1.5** - Agregado de solo junto a Carta de Munsell durante a determinação da cor. Fonte: Andrade (2020).

Quando se avalia a textura em campo, é comum estimar a proporção dessas frações através de sensações táteis. O material úmido quando passado entre o polegar e o indicador pode dar uma sensação de aspereza, sedosidade e pegajosidade, normalmente correlacionados com proporções de areia, silte e argila, respectivamente (Santos *et al.* 2005). Embora seja difícil avaliar, no campo, a proporção dessas frações em sua forma subdividida (areia grossa, média, fina, muito fina, silte e argila), é importante sua determinação. Neste trabalho, procurou-se adotar as classes de texturas do Sistema Americano (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA), de acordo com o *Soil Survey Manual* (Estados Unidos 1993) como forma de classificação das amostras. No caso, adotou-se uma versão em que ocorreu a alteração da classe muito argilosa para solos com mais de 60% de argila (Figura 1.6).



**Figura 1.6** - Classes texturais de solos e valores dos limites entre as frações granulométricas (Estados Unidos 1993).

A estruturação do solo refere-se ao padrão de arranjo de suas partículas primárias (areia, silte, argila) em unidades estruturais compostas chamadas de agregados, separadas entre si pelas superfícies de fraqueza, ou apenas superpostas e sem conformação definida (Santos *et al.* 2005). Diante disso, as estruturas das amostras foram classificadas segundo tipo, classe (tamanho) e grau. Dentre os tipos, existem agregados do solo com as seguintes formas geométricas: laminar, prismática, colunar, bloco angular, bloco subangular e granular (Figura 1.7). As classes das estruturas variam de muito pequena, pequena, média, grande e muito grande (Tabela 1.1).



**Figura 1.7** - Representação esquemática das formas de agregados que pode apresentar a estrutura do solo. Fonte: Verzutti (2021).

**Tabela 1.1** - Tipos e classes de estruturas de solos. Baseado em Santos *et al.* (2005).

Classes	Tipos (forma e arranjo dos agregados)						
	Laminar: a lâmina é aquela em que as partículas do solo estão arranjadas em torno de uma linha horizontal. As unidades estruturais têm aspecto de lâminas de espessura variável, porém a linha horizontal é sempre maior.	Prismática: é um tipo em que predomina a linha vertical. Forma de prisma.		Blocos: com três dimensões da mesma ordem de magnitude distribuídas em torno de um ponto			
		Sem o topo arredondado: <b>prismática</b>	Com o topo arredondado: <b>colunar</b>	Faces planas, a maioria dos vértices com ângulos vivos: <b>blocos angulares</b>	Mistura de faces arredondadas e planas, com muitos vértices arredondados: <b>blocos subangulares</b>	Forma e aspecto arredondados, sem faces de contato	
						Unidades de estrutura não porosas: <b>granular</b>	Unidades de estrutura porosas: <b>grumosa</b>
Muito pequena	< 1 mm	< 10 mm	< 10 mm	< 5 mm	< 5 mm	< 1 mm	< 1 mm
Pequena	1 a 2 mm	10 a 20 mm	10 a 20 mm	5 a 10 mm	5 a 10 mm	1 a 2 mm	1 a 2 mm
Média	2 a 5 mm	20 a 50 mm	20 a 50 mm	10 a 20 mm	10 a 20 mm	2 a 5 mm	2 a 5 mm
Grande	5 a 10 mm	50 a 100 mm	50 a 100 mm	20 a 50 mm	20 a 50 mm	5 a 10 mm	-
Muito grande	>10 mm	>100 mm	>100 mm	> 50 mm	> 50 mm	>10 mm	-

O grau de desenvolvimento das estruturas amostrais, que é a manifestação das condições de coesão dentro e fora dos agregados, foi classificado como (1) sem unidades estruturais ou pedis (grãos simples - não coerente; maciça - coerente) ou (2) com unidades estruturais ou pedis (A - fraca, as

unidades estruturais são pouco frequentes em relação à terra solta; B - moderada, as unidades estruturais são bem definidas e há pouco material solto; C - forte, as unidades estruturais são separadas com facilidade e quase não se observa material de solo solto) (Santos *et al.* 2005).

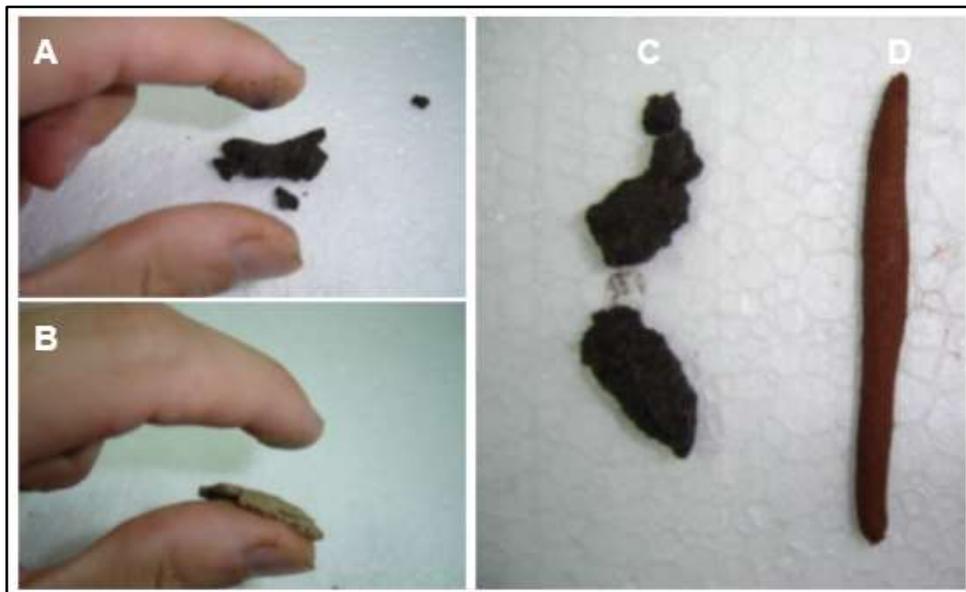
Destaca-se que informações como porosidade das amostras também foram levantadas. Porosidade se refere ao volume do solo ocupado por água e ar, sendo descrita quanto ao tamanho e a quantidade de poros - sem poros visíveis, mesmo com um aumento de 10X ou poros muito pequenos, inferiores a 1mm de diâmetro.

A consistência das amostras de solo designa a manifestação de forças físicas de coesão entre partículas do solo e de adesão entre as partículas e outros materiais, conforme variação dos graus de umidade. Assim, a consistência diz respeito à dureza, quando o solo se encontra seco, à friabilidade, quando o solo está úmido, e à plasticidade e à pegajosidade quando o solo está molhado. A Tabela 1.2 detalha a forma como realizou-se a descrição da consistência das amostras de solo. Na Figura 1.8 é possível observar ainda a determinação da consistência das amostras quando elas se encontram molhadas, ou seja, é ilustrado a classificação da pegajosidade e da plasticidade de alguns exemplos amostrais do presente trabalho.

**Tabela 1.2** - Consistência de solos segundo três estados de umidade padronizado: seco, úmido e molhado. Baseado em Santos *et al.* (2005).

<b>Consistência do solo</b>	
<b>DUREZA</b> (tentar quebrar um torrão a seco)	<b>Solta:</b> não coerente entre o polegar e o indicador.
	<b>Macia:</b> a massa do solo é fracamente coerente e frágil; quebra-se em material pulverizado ou grãos individuais sob pressão muito leve.
	<b>Ligeiramente dura:</b> fracamente resistente a pressão; facilmente quebrável entre o polegar e o indicador.
	<b>Dura:</b> moderadamente resistente à pressão, pode ser quebrado nas mãos, sem dificuldade, mas é dificilmente quebrável entre o indicador e o polegar.
	<b>Muito dura:</b> muito resistente à pressão. Somente com dificuldade pode ser quebrado nas mãos. Não quebrável entre o indicador e o polegar.
<b>FRIABILIDADE</b> (tentar quebrar um torrão úmido)	<b>Solta:</b> não coerente.
	<b>Muito friável:</b> o material do solo esboroa-se com pressão muito leve, mas agrega-se por compressão posterior.
	<b>Friável:</b> o material do solo esboroa-se facilmente sobre pressão fraca e moderada entre o polegar e o indicador e agrega-se por compressão posterior.
	<b>Firme:</b> o material do solo esboroa-se sob pressão moderada entre o indicador e o polegar, mas apresenta resistência distintamente perceptível.

	<p><b>Muito firme:</b> o material do solo esboroa-se sob forte pressão; dificilmente esmagável entre o indicador e o polegar.</p> <p><b>Extremamente firme:</b> o material do solo somente se esboroa sob pressão muito forte, não pode ser esmagado entre o indicador e o polegar e deve ser esmagado pedaço por pedaço.</p>
<p><b>PLASTICIDADE</b> (tentar fazer uma "minhoquinha" com solo molhado)</p>	<p><b>Não plástica:</b> quando muito, forma-se um fio que é facilmente deformado.</p>
	<p><b>Ligeiramente plástica:</b> forma-se um fio que é facilmente deformado.</p>
	<p><b>Plástica:</b> forma-se um fio, sendo necessário pressão moderada para sua deformação.</p>
	<p><b>Muito plástica:</b> forma-se um fio, sendo necessário muita pressão para deformá-lo.</p>
<p><b>PEGAJOSIDADE</b> (apertar e soltar o solo molhado e amassado entre o polegar e o indicador)</p>	<p><b>Não pegajosa:</b> após cessar a pressão, não se verifica praticamente nenhuma aderência da massa ao polegar e indicador.</p>
	<p><b>Ligeiramente pegajosa:</b> após cessar a pressão, o material adere a ambos os dedos, mas desprende-se de um deles perfeitamente. Não há apreciável estiramento ou alongamento quando os dedos são afastados.</p>
	<p><b>Pegajosa:</b> após cessar a pressão, o material adere a ambos os dedos e, quando estes são afastados, tendem a alongar-se um pouco e romper-se, em vez de desprender-se de qualquer um dos dedos.</p>
	<p><b>Muito pegajosa:</b> após a compressão, o material adere fortemente a ambos os dedos e alonga-se perceptivelmente quando eles são afastados.</p>



**Figura 1.8** - Ilustração da forma de classificação da consistência de algumas amostras de solo do presente trabalho quando o material se encontra molhado. Em A, o material é tido como não pegajoso e, em B, é ligeiramente pegajoso. Em C o material é classificado como não plástico e, em D, é ligeiramente plástico.

Todos os dados oriundos da classificação amostral foram organizados em uma tabela (disponível no Apêndice A) para sua sistematização e interpretação. A verificação de todos os

elementos supracitados se deu pelo uso de lupa, cartela granulométrica, carta de Munsell e recipiente com água para verificar a consistência quando úmida e molhada do material amostral.

O estabelecimento dessa classificação detalhada entre as amostras através de análises macroscópicas e de cores buscou eliminar confusões nas classificações feitas em campo e também viabilizar posteriormente o agrupamento dos resultados obtidos, com os quais se propõem esclarecer e detalhar a relação parental entre rocha alterada e material superficial estudado.

#### **1.5.4 Trabalho Laboratorial**

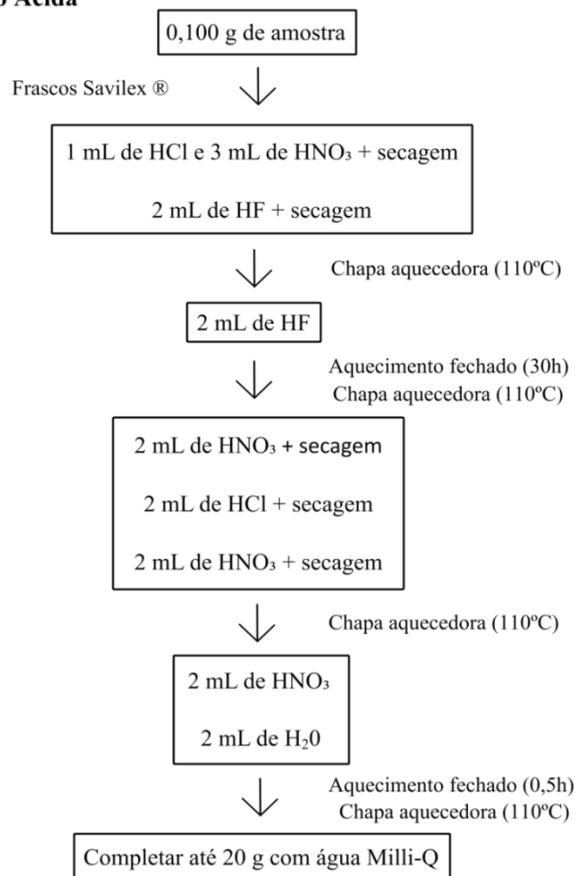
As análises laboratoriais consistem na realização de etapas de preparo das amostras, digestão e quantificação de elementos químicos nas amostras de sedimentos superficiais coletadas em campo, de diferentes fácies dos perfis (saprólito e produto alterado), a fim de identificar a presença de constituintes químicos importantes para o detalhamento da composição dos solos “borra de café”.

Numa primeira fase, as 31 amostras adquiridas ao longo dos 26 pontos visitados em trabalho de campo foram colocadas para secagem ao natural com intuito de serem posteriormente destinadas ao Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. A primeira etapa laboratorial compreendeu a moagem manual e a pulverização de todas as amostras secas com auxílio de almofariz e pistilo associados a métodos de quarteamento, buscando a redução da amostra a pequenas porções representativas da amostra inicial. Ademais, separaram-se ainda alíquotas de cada amostra após o processo de secagem para sua descrição e caracterização macroscópica detalhada.

O processo de digestão ácida das amostras (Figura 1.9) para posterior determinação da concentração dos elementos maiores, menores e traço, baseou-se nos trabalhos de Nogueira *et al.* (2019) e Nogueira (2018), e consistiu-se na digestão ácida total de 0,100g de amostra pulverizada com adição de HCl (37% m/m), HNO<sub>3</sub> (65% m/m), HF (40% m/m) e H<sub>2</sub>O ultrapuros (Merck, marca registrada). Inicialmente, adicionaram-se às amostras 1,0 mL de HCl e 3,0 mL de HNO<sub>3</sub>. Os frascos foram aquecidos em chapa aquecedora à 110 °C até completa secagem. Em seguida, um novo ataque ácido ocorreu com a adição de 2,0 mL de HF concentrado e aquecimento dos frascos em chapa aquecedora à 110 °C até a secura. A próxima etapa consistiu na adição de 2,0 mL de HF concentrado. Em seguida os frascos foram fechados com suas respectivas tampas e aquecidos em chapa aquecedora por 30 horas à 110°C. Após esse tempo, os frascos foram abertos e levados à secura na chapa aquecedora cerca de 110 °C. Adicionou-se em seguida 2,0 mL de HNO<sub>3</sub> e os frascos foram mantidos abertos em placa aquecedora à 110 °C até à secura. Novamente, adicionou-se 2,0 mL de HCl concentrado, mantendo-se os frascos abertos em chapa aquecedora até completa evaporação do líquido. HNO<sub>3</sub> 1:1 (4,0 mL) foi adicionado, onde os frascos mantiveram-se fechados por 0,5 h à 110°C. Por fim, as soluções obtidas foram diluídas para 20,0 g utilizando água ultrapura (Milli-Q, marca registrada) e transferidas para frascos de polietileno de 50 mL.

Como supracitado, as análises geoquímicas das amostras coletadas foram realizadas no Laboratório de Geoquímica (LGQa/DEGEO/UFOP) por meio da determinação das concentrações dos elementos maiores e menores em um espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), modelo Agilent 725, e também através da determinação da concentração dos elementos traço, incluindo os Elementos Terras Raras, em um espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), modelo Agilent 7700x (Figura 1.10).

### Digestão Ácida



**Figura 1.9** - Fluxograma de digestão total das amostras. Adaptado de Nogueira *et al.* (2019) e Nogueira (2018).



**Figura 1.10** - Espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) – Agilent 725 à esquerda. Espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) – Agilent 7700x. à direita. Fonte: Nogueira (2018).

O controle de qualidade das análises químicas foi realizado com a utilização dos seguintes materiais de referência certificados (MRC): GBW 07311 e BRP-01. As taxas de recuperação foram satisfatórias para todos os elementos avaliados, variando de 90 a 103%.

O plasma por acoplamento indutivo (ICP) consiste em uma das técnicas fundamentais para a realização de rápidas análises multielementares espectroscópicas. Entre as principais vantagens das metodologias do plasma destacam-se os baixos limites de detecção, altos níveis de precisão e exatidão e excelente linearidade nas curvas de calibração (tipicamente acima de 5 ordens de magnitude com o ICP-OES, e de 8 ordens de magnitude com o ICP-MS) (Navarro 2004).

O ICP-OES fundamenta-se como uma técnica analítica que se baseia na medida da emissão de radiação eletromagnética das regiões visível e ultravioleta do espectro eletromagnético por átomos neutros ou átomos ionizados excitados. Seu funcionamento ocorre por meio da utilização de um gás parcialmente ionizado (normalmente Ar, que é menos de 1% ionizado no plasma) dentro do qual uma amostra de líquido atomizado como aerossóis é injetada. A amostra ioniza no plasma e os íons emitem luzes de diferentes extensões que são, em seguida, medidas (Navarro 2004, Nogueira 2018).

No ICP com espectrômetro de massa ou ICP-MS, os íons gasosos gerados no plasma indutivo são introduzidos no espectrômetro de massas (MS), os quais são separados em função da razão massa/carga através do transporte sob ação de campos elétricos e magnéticos que modificam as suas trajetórias. O ICP-MS é ideal para a análise de elementos químicos em concentrações tão baixas quanto partes por trilhão. Contudo, impurezas no argônio podem causar problemas mais graves com o ICP-MS, devido à sua alta sensibilidade (Nogueira 2018).

As análises realizadas no ICP-OES foram feitas com o objetivo de determinar as concentrações dos seguintes elementos: Fe, Ca, Mg, Na, K, Al, P e Mn. Já as análises realizadas no ICP-MS objetivaram a determinação dos seguintes elementos-traço: As, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Sc, Sr, V, Y, Zn, Be, Sb, Zr, Pb, S, Ti, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ta, Tl, Pb, Th, U. A tabela completa com os resultados químicos referentes a cada amostra pode ser visualizada em Apêndice B.

### **1.5.5 Discussão dos Resultados e Confecção da Monografia**

Integrou-se todos os resultados quantitativos e qualitativos obtidos por meio do trabalho de campo, das descrições amostrais e das análises geoquímicas elementares, estabelecendo em seguida uma caracterização física e química dos materiais amostrados e definição de um padrão característico definitivo para os solos “borra de café”. A fim de eliminar confusões nas classificações pedológicas realizadas em campo e de viabilizar o agrupamento dos resultados, com os quais se propôs esclarecer e

detalhar a relação parental entre rocha alterada e material superficial estudado. Por fim, elaborou-se o relatório final, dadas as conclusões e alcançado o objetivo deste presente trabalho.

## CAPÍTULO 2

### ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

---

Geograficamente, a área de estudo deste trabalho está localizada na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero (QFe), mais precisamente ao longo do Sinclinal Dom Bosco (Figura 1.1), e é composta majoritariamente por distritos da cidade de Ouro Preto. Essa região constitui o marco principal da interiorização da ocupação portuguesa no século XVIII, e atualmente, num estado onde a exploração de minérios é uma das principais atividades econômicas, assume uma importância nacional, uma vez que faz parte da mais importante província mineral do país.

A região é também sede de diversas áreas de proteção ambiental e de diversas categorias de unidades de conservação, destacando-se a Área de Proteção Ambiental das Andorinhas, o Parque Estadual do Itacolomi, a Floresta do Uaimii e a Estação Ecológica do Tripuí.

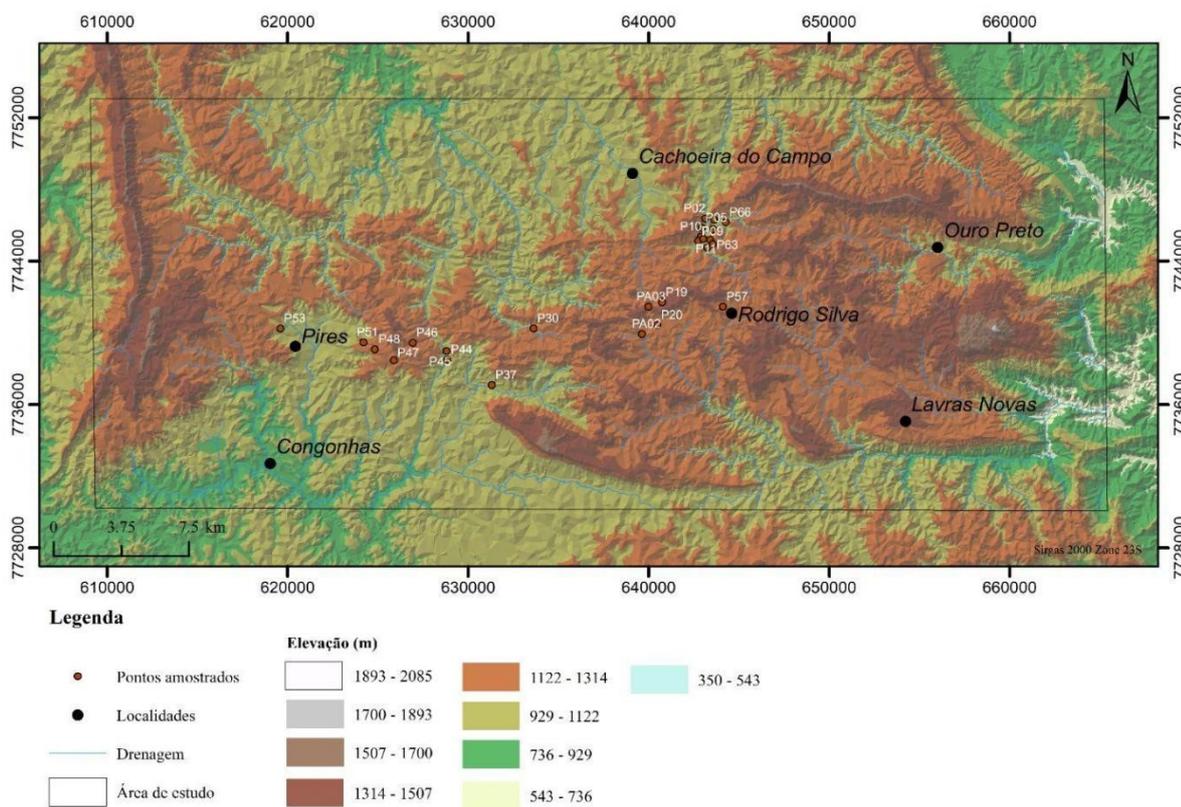
#### 2.1 RELEVO E HIDROGRAFIA

A evolução geomorfológica e conformação do relevo atual do Quadrilátero Ferrífero está relacionada à existência de grandes dobramentos regionais. Essas amplas estruturas articuladas na forma de anticlinais e sinclinais passaram por processos erosivos que promoveu a inversão do relevo, com os anticlinais constituindo os vales dissecados e os sinclinais, em posições mais elevadas, cujas abas constituem os alinhamentos das serras que caracterizam a região (Barbosa & Rodrigues 1965). Todo esse conjunto se encontra tectonicamente soerguido com intervalo de altitude entre 900 e 2000 metros (Carvalho Filho 2008).

Sobre esta perspectiva, o relevo da região estudada ao longo do Sinclinal Dom Bosco (Figura 2.1) apresenta cristas e colinas com vales encaixados e/ou fundos chatos, possuindo uma forte influência de variáveis geológicas (litologias, foliação e falhamentos). Destaca-se que os flancos dos sinclinais encontram-se protegidos por litotipos resistentes (quartzitos e itabiritos).

Outro aspecto que merece destaque é a frequente disposição de pontos amostrais (Figura 2.1) de solos em zonas de drenagens, cerca de 69,2% dos pontos amostrados. Espera-se que essa situação contribua para a formulação de solos do tipo “borra de café”, uma vez que facilita um maior enriquecimento ou empobrecimento de elementos químicos do material.

Sabe-se que em um perfil contínuo de um mesmo material, a posição do lençol freático (no caso estudado drenagens) determina a existência de zona saturada e não saturada, e, conseqüente geração de produtos intempéricos diferentes com porções mais redutoras ou não.

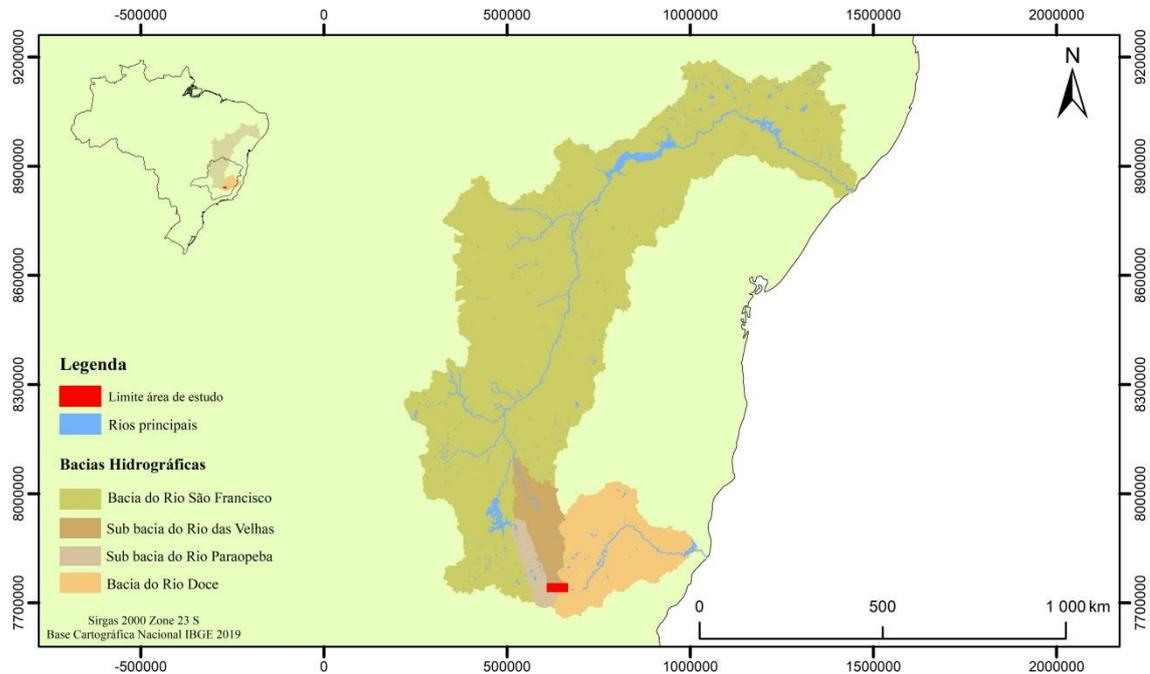


**Figura 2.1** - Modelo digital de elevação em metros da região estudada. Realizado com o banco de dados GIS de Endo *et al.* (2020).

Outro ponto a se considerar é que os processos de alteração pedológicas ocorrem em função de fatores influentes combinados, no caso, os geomorfológicos/topográficos e os climáticos. Assim, em zonas com vertentes mais acentuadas de clima úmido predominam-se os processos de drenagem por escoamento superficial com pouca água sendo infiltrada e conseqüente prejuízo no processo de alteração por infiltração. Já em zonas mais aplainadas, o processo de lixiviação do material predomina, ou seja, há a infiltração da água e intemperização de minerais. As correlações existentes entre as amostragens obtidas nessas porções de drenagem encontram-se detalhadas nos próximos capítulos.

Em termos hidrológicos, a região estudada abrange as cabeceiras de duas das principais bacias brasileiras: a do rio São Francisco e a do rio Doce (Figura 2.2). As sub bacias hidrográficas do rio das Velhas e do rio Paraopeba estão inseridas em sua totalidade no Estado de Minas Gerais, mais precisamente no interior da grande bacia do rio São Francisco e juntas perfazem a maior porção da área estudada. Ao todo, a sub bacia Rio das Velhas possui uma área de mais de 29 mil quilômetros quadrados e abrange o rio das Velhas como maior afluente do rio São Francisco com mais de 800 quilômetros de extensão. Já a sub bacia Paraopeba, com mais de 12 mil quilômetros quadrados, tem o rio Paraopeba como seu principal afluente.

A bacia do rio Doce é uma das grandes bacias hidrográficas de Minas Gerais com uma área de drenagem de 83400 quilômetros quadrados. Ela drena a porção leste do estado até atingir a porção norte do estado do Espírito Santo e, por fim, deságua no oceano Atlântico.



**Figura 2.2** - Mapa com a disposição das bacias hidrográficas presentes na região de estudo destacada em vermelho. Realizado com o banco de dados GIS de Endo *et al.* (2020).

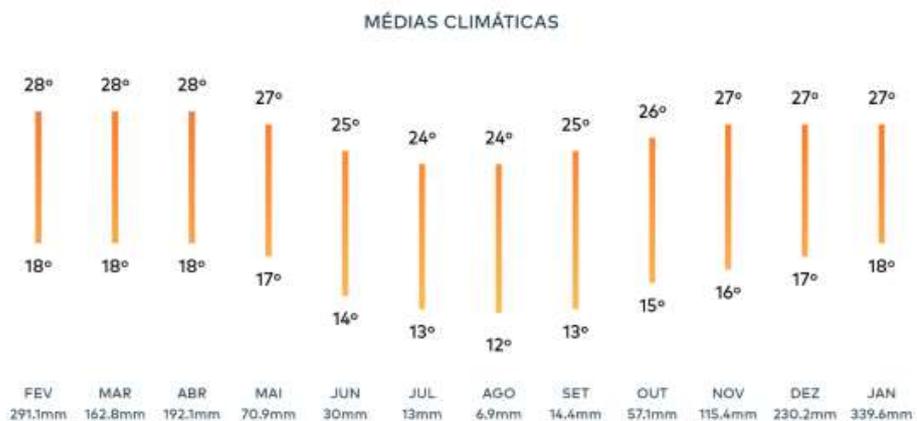
Segundo Endo *et al.* (2020), a estruturação geomorfológica e os traço das drenagens no interior do Sinclinal Dom Bosco (Figura 2.1) indicam que os cursos de água principais estão encaixados em zonas de fraqueza de direção aproximadamente N-S, que seguem o contorno geral das camadas e das charneiras dos grandes dobramentos. Em sua porção norte, as descargas associadas aos aquíferos Cauê e Gandarela estão localizadas próximas ao núcleo do sinclinal e associadas a estruturas NNW-SSE (Endo *et al.* 2020).

## 2.2 CLIMA

O clima na região de Ouro Preto-MG é caracterizado como tropical de altitude. As condições climáticas são marcadas por temperaturas amenas e índices pluviométricos variando de moderado a alto.

Em Ouro Preto, as médias climáticas (Figura 2.3) dos verões não costumam passar dos 28°C. Já os invernos são frios e podem chegar a temperaturas médias próximas a 10°C. Enquanto isso, a primavera e o outono apresentam climas mais amenos, variando na faixa de 17°C. Em relação aos níveis pluviométricos, os maiores índices de chuvas estão concentrados no verão, assim como menores

aportes pluviométricos durante o inverno, mantendo-se com baixo nível ao longo do outono e da primavera.



**Figura 2.3** - Ilustração das médias climáticas e precipitação por mês da cidade de Ouro Preto. Fonte: [www.tempoagora.com.br](http://www.tempoagora.com.br). Data de acesso: outubro de 2021.

### 2.3 VEGETAÇÃO

A vegetação da área é classificada como sendo uma transição entre Mata Atlântica e Cerrado, possuindo também um grande aporte de campos rupestres ferruginosos. Ao longo do Quadrilátero Ferrífero é possível encontrar entre as fisionomias de maior destaque: floresta estacional semidecidual, matas ripárias, florestas estacionais semidecíduais sibmontanas, montanas e altomontanas, ou “ilhas de altitude”, campo cerrado, cerrado *stricto sensu* e campos rupestres (Jacobi *et al.* 2008).

Num contexto geral de altitudes mais elevadas, a vegetação é predominantemente mais típica de Cerrado, chegando a conter plantas com troncos tortuosos e até pequenos cactos. Porém, descendo na topografia, a mudança da vegetação é visível, passando a ficar cada vez mais densa devido a presença de árvores de grande porte, expondo o contraste em relação à vegetação de cerrado.

### 2.4 SOLOS

Sob a influência de grande variabilidade litológica, em conexão com um longo período de evolução geomorfológica, a região é marcada por acentuados contrastes topográficos. Carvalho Filho *et al.* (2010) retratam a existência de domínios de solos pouco evoluídos (cambissolos e neossolos), de baixa fertilidade natural em zonas topográficas mais elevadas. Em algumas porções é expressiva a ocorrência de afloramentos rochosos. Já nas áreas rebaixadas, a presença massiva é de argissolos encontrados, por exemplo, em planícies fluviais (Carvalho Filho *et al.* 2010).

Para os autores é marcante ainda a influência do material de origem nas características dos solos, com destaque para o conjunto de solos relacionados a rochas ferríferas, distinguidos pelos teores

de óxidos de ferro muito elevados e intensa cor vermelha, em alguns casos de notável escurecimento condicionado à alta concentração de compostos de manganês e pela constituição mineralógica oxidica. A presença de concreções ferruginosas é também muito comum nesses solos. Assim, predominam no QFe, Cambissolos Háplicos Perféricos e ocorrências menores de Latossolos Vermelhos Perféricos, que tendem a localizar-se em rampas coluvionares de sopé.

## **2.5 ECONOMIA**

Com cerca de 7 mil quilômetros quadrados, o QFe estende-se entre Ouro Preto e Belo Horizonte, incluindo também os municípios de Brumadinho, Caeté, Congonhas, Itabira, Itaúna, Mariana, Rio Piracicaba, Sabará, Santa Bárbara, São Gonçalo do Rio Abaixo, entre outras. E, ainda hoje, é considerada a mais importante província mineral do Sudeste do Brasil (e uma das mais importantes de todo o país), se destacando no cenário nacional pela grande riqueza mineral, principalmente na produção de minério de Ferro, Ouro e Manganês.

Além disso, é a região de maior concentração urbana de Minas Gerais, com importância fundamental no desenvolvimento econômico estadual, impulsionando inclusive, o setor industrial, sobretudo o segmento siderúrgico, o que, conseqüentemente, traz benefícios significativos para toda a sociedade.

Em relação a sua economia, Ouro Preto apresenta como principais atividades econômicas o turismo, a indústria de transformação e a mineração de reservas minerais de seu subsolo, tais como ferro, bauxita, manganês, talco e mármore. Dentre os minerais de importância explorados encontram-se o ouro, a hematita, a dolomita, turmalina, pirita, muscovita, topázio e topázio imperial.

## CAPÍTULO 3

### CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

---

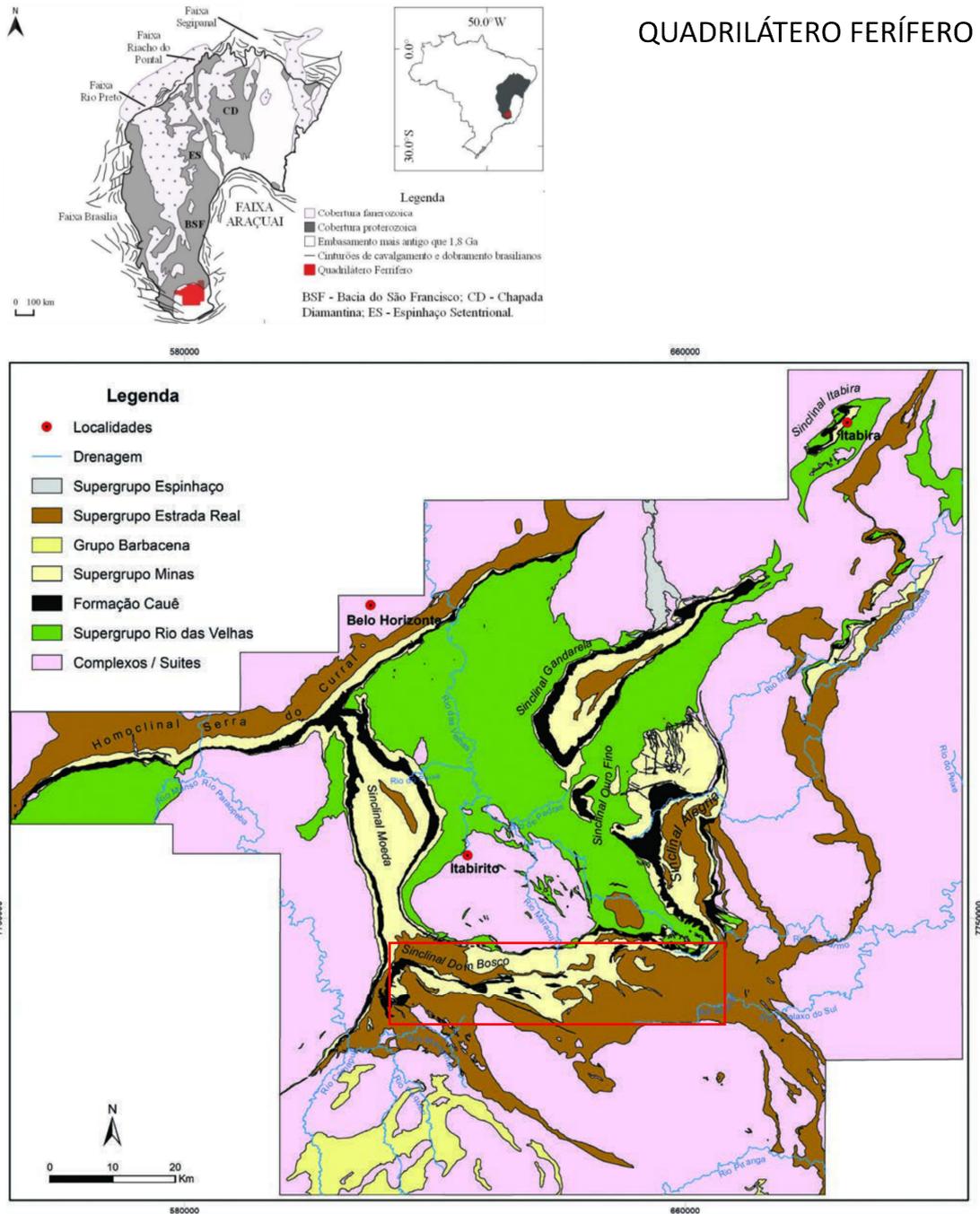
#### 3.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

O Quadrilátero Ferrífero, localizado no extremo sul do Cráton São Francisco, é composto por três grandes domínios tectono-estratigráficos: terrenos granito-gnáissicos (TTG), sequências do tipo *greenstone belt* e sequências supracrustais sedimentares clásticas e químicas (Alkmim & Marshak 1998), que registram a complexa superposição de sucessivos ciclos geodinâmicos, respectivamente, os Ciclo Orogênicos Transamazônico e Brasileiro (Almeida 1977). Esses ciclos foram, por sua vez, responsáveis pela quebra e aglutinação de grandes massas continentais ao longo do tempo geológico (Baltazar & Lobato 2020). A Figura 3.1 detalha a litoestratigrafia e as estruturas do Quadrilátero Ferrífero e, em menor detalhe, ilustra sua posição na extremidade sul do Cráton São Francisco.

A complexidade estrutural dessa região levou diversos autores a dedicarem esforços para a compreensão de sua evolução geotectônica. Marshak & Alkmim (1989) e Alkmim & Marshak (1998) propõem um modelo que considera o Quadrilátero Ferrífero como uma província geológica estruturada em “domos e quilhas”. Nesse modelo, o embasamento Arqueano representado por rochas granito-gnáissicas e migmatitos comporta-se como domos (i.e. Complexo Bação, Complexo Bonfim, Complexo Caeté) circundados por quilhas formadas por rochas do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas. As quilhas incluem mega dobras sinclinais (Sinclinais Moeda, Dom Bosco e Pitangui-Pequi) e um grande homoclinal (Serra do Curral). Alkmim & Marshak (1998) identificaram também outros padrões estruturais da arquitetura geológica do QFe, a saber: (1) estruturas de direção NE-SW - Sinclinal Gandarela, Anticlinal Conceição, Homoclinal Serra do Curral e os sinclinais Itabira e Monlevade; e (2) sistema de cavalgamentos de direção N-S e vergência oeste.

Endo *et al.* (2005) e Almeida (2004) propuseram um modelo evolutivo para o Quadrilátero Ferrífero constituído por nappes superpostas deformadas associadas a três gerações de eventos que resultaram em dobras de primeira e segunda ordem. A primeira geração originou a Nappe Curral, de vergência para N-NE, uma megadobra alóctone, que possui grande importância no arranjo estrutural do setor ocidental do QFe. Dentre os principais dobramentos associados estão os anticlinais Bonfim, Curral, dos Fechos e Catarina e os sinclinais Moeda, Mutuca, Gaivotas e Mangabeiras. A segunda geração, formou a Nappe Ouro Preto, com vergência para S-SW, e sobreposta à Nappe Curral, tendo como principais dobras associadas as anticlinais de Mariana, Santo Antônio e Conceição e os sinclinais Gandarela, Ouro Fino, Santa Rita, Itabira, Monlevade, Vargem do Lima e Dom Bosco. A terceira geração é caracterizada por amplificação e redobramento das estruturas originadas de

encurtamentos tectônicos de direções EW e NS. A Figura 3.2 ilustra a articulação das Nappes Curral e Ouro Preto segundo Endo *et al.* (2005).



**Figura 3.1** - Mapa litostrutural do Quadrilátero Ferrífero com destaque para sua disposição na extremidade sul do Cráton São Francisco. Área de estudo identificada em vermelho. Baseado em Dorr (1969) e no compilado de conhecimentos e pesquisas contemplando os avanços dos últimos 50 anos dos trabalhos desenvolvidos na região (Endo *et al.* 2020).

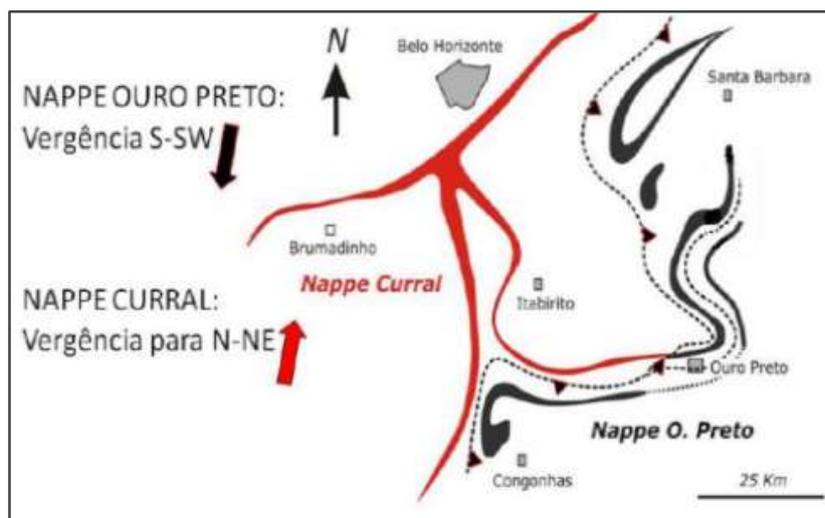


Figura 3.2 - Mapa esquemático de articulação das Nappes Curral e Ouro Preto. Retirado de Endo *et al.* (2005).

## 3.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

### 3.2.1 Apresentação

A estratigrafia regional será abordada de forma geral, passando pelas unidades do Supergrupo Minas, especificamente pelas litologias metacarbonatadas dos Grupos Itabira e Piracicaba que formam o Sinclinal Dom Bosco, área alvo do presente trabalho, uma vez que estudos anteriores como o de Gandini (1994) retratam mineralizações de topázio imperial e concentrações variáveis de minerais como especularita, barita, florencita e rutilo nesses litotipos e em seus produtos de alterações superficiais (solos conhecidos como “borra de café” e/ou “brown terrena”).

### 3.2.2 Estratigrafia Local

A história evolutiva do Quadrilátero Ferrífero é constituída por unidades litoestratigráficas e litodêmicas do Arqueano, do Paleo-Mesoproterozoico e do Cenozoico, retratadas pelos complexos metamórficos do embasamento, Supergrupos Rio das Velhas, Minas e Estrada Real, Supergrupo Espinhaço e unidades sedimentares, correspondentes às coberturas do Paleógeno ao Holoceno, constituídas por sedimentos terrígenos (Endo *et al.* 2020). Abaixo é apresentada a coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019b), e a seguir, sua compilação descritiva.

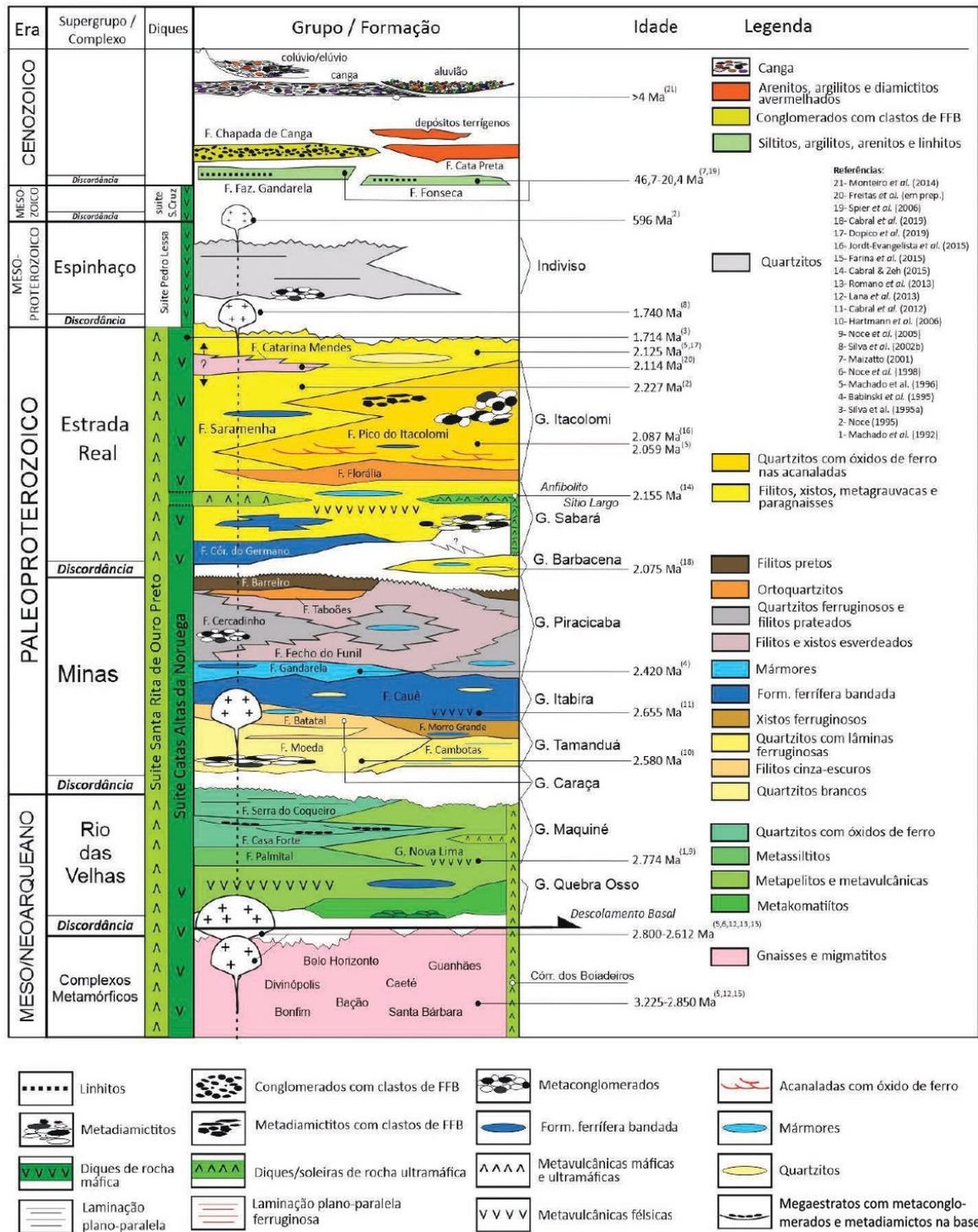


Figura 3.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero retirada de Endo *et al.* (2019b).

### 3.2.2.1 Complexos do Embasamento

Os complexos ígneos metamórficos (3220-2770 Ma) são considerados os representantes aflorantes de uma crosta antiga que serviu de embasamento às sequências supracrustais póstumas. (Fraga 1992). O comportamento metamórfico desta unidade é geralmente polifásico, afetado por metamorfismo regional sob condições de pressão e temperatura de fácies anfibolito médio a superior e

por um retrometamorfismo de fácies xisto verde (Fraga 1992; Endo 1997). No QFe, eles ocorrem majoritariamente como estruturas dômicas formadas durante o Arqueano, e constituem-se predominantemente por gnaisses de composições trondhjémítica, tonalítica e granodiorítica (TTG), com ou sem inclusões anfíbolíticas, por migmatitos e por granitos de composições variadas (Endo 1997; Chemale Jr et al. 1991). Setores de exposição dessas litologias na região merecem destaque, tais como os complexos: Bação, Belo Horizonte, Bonfim, Caeté, Congonhas e Santa Rita (Fraga 1992; Almeida 2004).

### 3.2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas de idade Arqueana repousa discordantemente sobre as rochas do embasamento cristalino, sendo cortado por intrusões de rochas graníticas (Almeida 2004). Esta unidade é afetada por um comportamento metamórfico de fácies xisto-verde, com aumento do grau de oeste para leste do Quadrilátero Ferrífero, podendo alcançar a fácies anfíbolito (Endo 1997; Dorr 1969; Ladeira 1980). As sequências metavulcanossedimentares foram subdivididas nos grupos Nova Lima (base), Maquiné (topo) (Dorr 1969, Baltazar & Zucchetti 2007) e Quebra Ossos (Schorscher 1978, 1979).

O Grupo Quebra Osso abrange as principais ocorrências de rochas vulcânicas máficas-ultramáficas (rochas de cinturões verdes - *greenstone belt*) no QFe, como basaltos, komatiitos com textura spinifex e pillow-lavas, cinzas e detritos vulcânicos, rochas predominantemente de assoalho oceânico (Baltazar & Zucchetti 2007; Endo 1997). O Grupo Nova Lima, mais amplo, compreende rochas metamáficas/metaultramáficas, esteatitos, filitos ferruginosos, quartzitos, grauvacas e formações ferríferas bandadas do tipo Algoma (Farina *et al.* 2016). Além disso, este grupo concentra os depósitos de ouro de maior volume do Quadrilátero Ferrífero relacionados a hidrotermalismo em zonas de cisalhamento de empurrões Arqueanas. (Baltazar & Zucchetti 2007). Sobrepostas a este conjunto litológico, encontram-se as rochas predominantemente quartzíticas do Grupo Maquiné, individualizadas para este grupo nas formações Palmital (basal) e Casa Forte (Dorr 1969).

### 3.2.2.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas consiste em uma sequência metassedimentar de idade Paleoproterozoica constituída predominantemente por sedimentos plataformais clásticos e químicos que ocorrem sobre o Supergrupo Rio das Velhas em nítida discordância estratigráfica (Dorr 1969; Alkmim e Marshak 1998). Essa deposição na bacia Minas desenvolveu-se inicialmente em ambiente continental e posteriormente marinho, durante a fase extensional do Transamazônico (Alkmim & Marshak 1998). Seus estratos são mais resistentes à erosão do que o embasamento ou as rochas verdes da região, formando, assim, as cordilheiras mineiras que bordejam o QFe (Alkmim e Marshak 1998).

O empilhamento estratigráfico deste supergrupo pode ser compreendido por cinco unidades. A unidade basal compreende os grupos Tamanduá e Caraça, segundo Alkmim & Marshak (1998), sendo

composta por conglomerados e arenitos, com gradação normal para pelitos marinhos de águas rasas. Dorr (1969) subdividiu o Grupo Tamanduá em duas unidades: Formação Cambotas, basal, formada por quartzitos com camadas de conglomerados com seixos de formação ferrífera e a formação superior que Endo *et al.* (2004a) denominou Formação Morro Grande, sendo esta constituída por xistos diversos, filitos e formações ferríferas subordinadas.

O Grupo Caraça constituído por rochas clásticas é dividido em duas formações. A Formação Moeda, basal, é composta por litologias de composição quartizíticas, incluindo metaconglomerados, filitos, quartzitos de grão fino a grosso com variações de sericita (Dorr 1969). E a Formação Batatal, composta por filitos, filitos sericíticos, filitos grafitosos, formação ferrífera e, subordinadamente, metacherts (Dorr 1969).

Posteriormente a metassedimentação do Grupo Caraça, um contexto de estabilidade tectônica e de deposição de natureza química marcou o período deposicional do Grupo Itabira (Renger 1994). Essa unidade intermediária compreende duas formações em contato gradacional, que correspondem às Formações Cauê (inferior) e Gandarela (superior). A Formação Cauê é constituída de itabiritos e itabiritos dolomíticos e anfibolíticos, além de lentes de filito e marga (Fraga 1992; Endo 1997; Dorr 1969). A Formação Gandarela é composta essencialmente por itabiritos dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitos, calcários e mármores (Dorr 1969). Esta formação possui considerável significado econômico: exploram-se pedras para construção e ornamentação, além de numerosos depósitos de manganês e de hematita de alto teor. Mineralizações de topázios imperiais na forma de jazidas e/ou ocorrências são encontradas predominantemente em veios de rochas dolomíticas metamorfizadas como as existentes na Formação Gandarela, e também em algumas Formações do Grupo Piracicaba (Cercadinho, Fecho do Funil e Sabará) (Gandini 1994).

O Grupo Piracicaba sobrepõe o Grupo Itabira com discordâncias locais, sendo seus sedimentos de origem marinha rasa e deltaica (Alkmim & Marshak 1998). É formado, da base para o topo, pelas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A única Formação deste grupo com distribuição regional é a Formação Cercadinho, tendo as demais ocorrências restritas (Dorr 1969; Gandini 1994). A Formação Cercadinho é composta por quartzitos e filitos quase sempre em intercalações rítmicas, ambos podendo ter composição ferruginosa (Dorr 1969; Gandini 1994). Sua deposição ocorreu durante progressiva instabilidade dentro do QFe, em que a sedimentação típica plataformal fora interrompida por regressão marinha; as demais Formações deste Grupo são caracterizadas como sequências transgressivas (Gandini 1994). Segue-se, estratigraficamente, a Formação Fecho do Funil, composta por filitos dolomíticos, filitos e dolomitos impuros (Endo 1997). Posteriormente, deposita-se a Formação Taboões, que possui quartzitos lenticulares, equigranulares e maciços, e é sobreposta pela Formação Barreiro, composta por filitos e filitos grafitosos (Endo 1997; Fraga 1992).

#### **3.2.2.4 Supergrupo Estrada Real**

O Supergrupo Estrada Real é composto pelos grupos Sabará e Itacolomi e representa uma sucessão do tipo flysch e molassa sin-orogênicos (Endo *et al.* 2020). Na base, o Grupo Sabará, é constituído por biotita e clorita xisto com intercalações de metagrauvaca, quartzito, quartzito feldspático e ferruginoso, formação ferrífera e metaconglomerado (Dorr 1969; Renger *et al.* 1994; Endo 1997). No topo, o Grupo Itacolomi compreende metarenitos grosseiros, metaconglomerados polimíticos e filitos separados do contato inferior com o Supergrupo Minas por uma inconformidade angular regional (Dorr 1969; Farina 2016). O grupo tem ainda distribuição restrita, limitada à região mais ao sul do Quadrilátero Ferrífero (sul de Ouro Preto) (Farina 2016).

As unidades do Grupo Barbacena, representadas por grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganésíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfíbolito e metaultramáficas, que ocorrem na porção meridional do Quadrilátero são correlativas ao Grupo Sabará (Endo *et al.* 2020).

#### **3.2.2.5 Rochas Intrusivas Pós Minas**

Considerados por Alkmim & Marshak (1998) como Rochas Intrusivas Pós Minas, os diques máficos e intermediários cortam tanto o embasamento cristalino, quanto às rochas supracrustais do Supergrupo Minas. Silva *et al.* (1995) apontam a existência de três enxames de diques na região do Quadrilátero Ferrífero, todos compostos por toleitos posicionados em rifts continentais. O mais antigo apresenta direção N-S, encontrando-se metamorfizado, e relacionado à abertura da bacia Espinhaço (1714 Ma); o intermediário, majoritariamente metamorfizado, com idade de 906 Ma (Machado *et al.* 1989) e direções NE-SW; e o mais novo, Mesozoico (220-170 Ma (Dussin 1994) e 120 Ma (Silva *et al.* 1995), sem deformações e com orientações em todas as direções, ocorre relacionado à separação dos continentes americano e africano.

#### **3.2.2.6 Coberturas Cenozoicas**

Os depósitos sedimentares, mais recentes que o Grupo Itacolomi e pertencentes à Era Cenozoica, têm ocorrência esporádica e restrita no Quadrilátero Ferrífero, sendo representados por bacias interiores (Gandarela, Fonseca, Rio do Peixe, depósito Gongo Sôco), por ocorrências de corpos argilosos, designados mudstones (Dorr 1969; Guild 1957), por lateritas (Almeida 2004) e depósitos elúvio-coluvionares e de aluvião. Destaca-se que a maioria dos trabalhos litoestratigráficos enfatizaram apenas o Pré-Cambriano no QFe, como o de Alkmim e Marshak (1998) ao proporem sua coluna estratigráfica. Contudo, três novas Formações foram propostas acima do Grupo Itacolomi.

Maxwell (1972), baseando-se na coluna estratigráfica apresentada por Dorr (1969), incluiu os sedimentos Terciários encontrados no QFe como pertencentes a Formação Fonseca, constituída, predominantemente, por linhitos, siltitos, argilitos e arenitos depositados sobre conglomerados. Relacionou-os ainda a depósitos sedimentares flúvio-lacustres de provável idade Pliocênica, baseando-

se em impressões foliares fossilizadas. Dorr (1969) relata uma profunda discordância angular e erosiva no contato entre o topo do Grupo Itacolomi e a base da Formação Florália (Fonseca) do período Terciário. Sobrepostos à Formação Fonseca, Formação Chapada da Canga é constituída por depósitos Rudáceos de ortoconglomerados oligomíticos contendo seixos de itabirito numa matriz ferruginosa fina, associados a depósitos de leques aluviais (Sant'anna 1994).

A Formação Fazenda do Gandarela é constituída, predominantemente, por argilitos, arenitos e linhitos recobertos por uma camada de argila avermelhada e canga (Gorceix 1884). Maizatto (2001) sugere que a sedimentação ocorreu entre Neoeoceno e o Eomioceno e que as fácies sedimentares foram associadas a depósitos lacustres e de fluxos de detritos.

A Formação Cata Preta é constituída por arenitos maciços de coloração avermelhada e conglomerados polimíticos relacionados à depósitos de leques aluviais, encontrando-se sobreposta pela Formação Chapada de Canga (Castro & Ferreira 1997, Castro *et al.* 1998). Além disso, diversos depósitos isolados similares à essa formação ocorrem no Quadrilátero, sendo coletivamente designados de Depósitos Terrígenos (Endo *et al.* 2019a,b).

Segundo Endo *et al.* (2020), depósitos elúvio-coluvionares ocorrem em todo o Quadrilátero Ferrífero, especialmente nas regiões elevadas suportadas pela presença de formações ferríferas e quartzitos. Já grandes acumulações de material aluvionar são incomuns, pois a maioria dos canais de fluxo se encontram bem acima dos níveis de base regionais. Entretanto, em alguns canais, o gradiente de fluxo se torna muito baixo, possibilitando a formação de depósitos aluvionares de areia e cascalho tanto no leito ativo dos rios, quanto em terraços antigos (Endo *et al.* 2020).

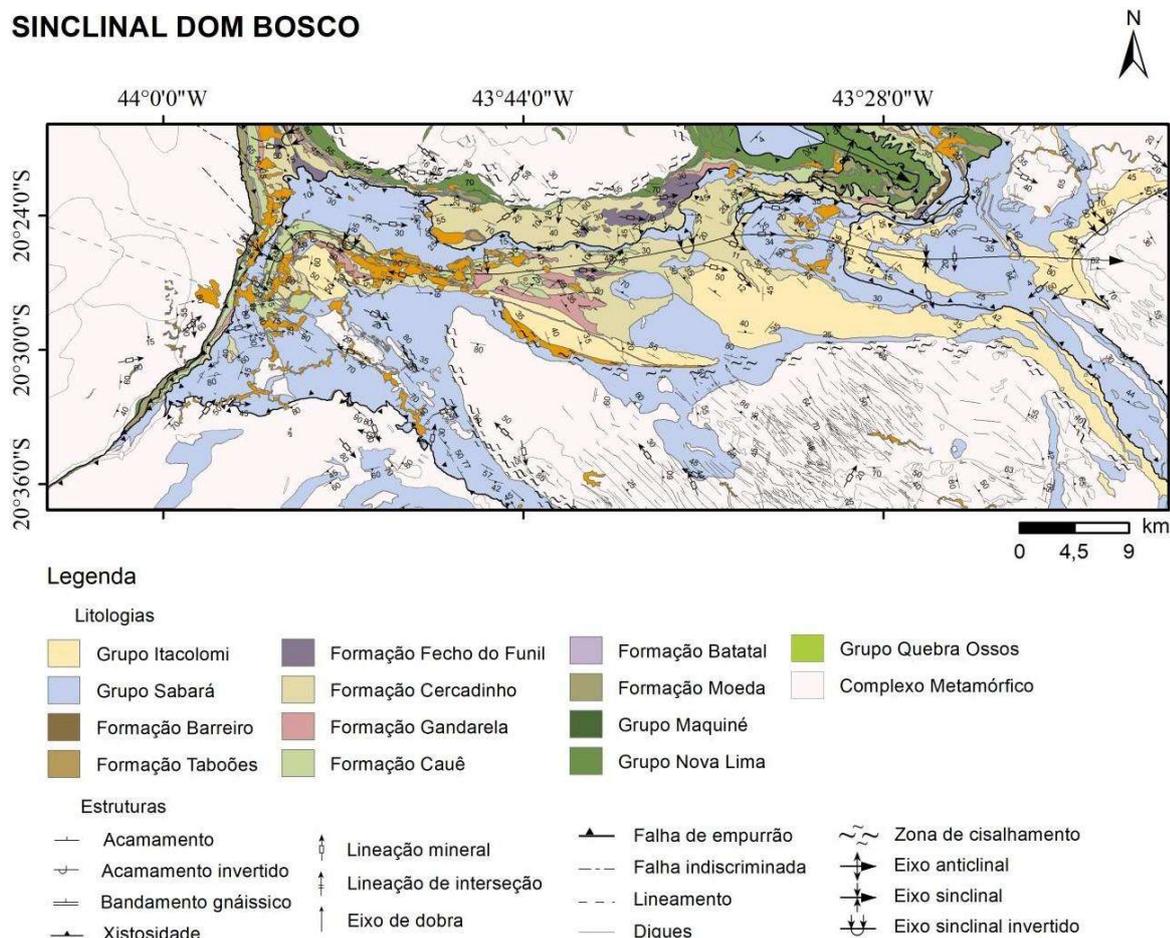
### 3.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

As estruturas presentes no Quadrilátero Ferrífero têm sua complexidade devido a eventos deformacionais não correlatos que decorreram em seus domínios e que acabaram por influenciar o arcabouço estrutural da região. Dentre essas estruturas, destaca-se, no presente estudo, o Sinclinal Dom Bosco. Este pode ser visto na porção inferior da Figura 3.1 e em maior detalhe na Figura 3.4.

O Sinclinal Dom Bosco consiste em uma estrutura regional de eixo E-W com mais de 40 km de comprimento localizada ao sul do Quadrilátero Ferrífero. Seu núcleo expõe extensos afloramentos dos Grupo Itabira e Piracicaba, enquanto suas bordas abrangem, principalmente, a Formação Moeda e o Supergrupo Rio das Velhas (Dopico *et al.* 2017). Sua porção norte é delimitada pelo Anticlinal de Mariana e pelo Complexo Metamórfico Bação, apresentando o flanco norte bem preservado, e que com frequência é possível reconhecer estruturas sedimentares primárias que podem estar truncadas e obliteradas por foliação milonítica (Endo *et al.* 1992); vale ressaltar que apenas em torno do Anticlinal de Mariana suas camadas se encontram fortemente dobradas e falhadas (Endo 1997). Em contrapartida, todo o flanco sul é bastante complexo estruturalmente. Guild (1957) e Endo (1997) caracterizaram esta

porção sul como um arranjo estrutural e estratigráfico complicado, com efeitos de segmentação tectônica, processada por falhas de empurrão e de rasgamento.

### SINCLINAL DOM BOSCO



**Figura 3.4** - Mapa litoestrutural da porção centro norte do Sinclinal Dom Bosco. Baseado no compilado de pesquisas desenvolvidas no Quadrilátero Ferrífero ao longo dos últimos 50 anos (Endo *et al.* 2020).

Chemale Jr. *et al.* (1991) expõem também que o Sinclinal Dom Bosco é cortado por uma série de cavalgamentos representados por geometria de rampas e patamares, com falhas direcionais associadas. Em planta, apresentam direção aproximada N-S, com traço arqueados (geometria de canoa) que se estendem desde o extremo leste do Sinclinal até o Complexo Bonfim. Esses falhamentos caracterizam-se por possuir três famílias de estruturas, a primeira em regime dúctil e a segunda e a terceira em regime rúptil-dúctil a dúctil-rúptil, geradas por meio de deslocamentos de massas de E para W durante o Brasiliano (Chemale Jr. *et al.* 1991; Marshak & Alkmim 1989).

Em sua porção sul, o Sinclinal Dom Bosco é balizado pela Falha do Engenho que secciona também o Sinclinal Moeda e os sistemas de empurrões já descritos. Definida por Guild (1957) como uma falha de rasgamento que delimita as sequências de rochas Arqueanas das Paleo-Meso Proterozoicas, estendendo-se por 70 km na porção Sul do QFe, com direção preferencial E-W, sofrendo inflexão para SW na extremidade oeste e para SE na extremidade oposta.

## CAPÍTULO 4

### EMBASAMENTO TEÓRICO

---

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA REGIONAL

A análise geoquímica de solos é muito utilizada para identificar áreas com alta e baixa concentração de elementos traço ou Terras Raras por exemplo, além de ser um excelente critério para julgar a extensão de acumulação de um determinado metal no solo, podendo orientar os estudos acerca da potencialidade de exploração de determinado bem mineral, como por exemplo o topázio imperial associado a solos “borra de café”, além de permitir que pesquisas elucidem problemas nutricionais (em plantas e animais), de saúde e ambientais. No presente trabalho, a análise geoquímica dos solos mapeados permitirá detalhar composicionalmente o modo de ocorrência do solo “borra de café”.

Neste tópico será apresentado um breve retrato da disposição geoquímica das principais unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero, com enfoque para aquelas discutidas no presente trabalho como sendo possíveis materiais parentais para o solo “borra de café” - litotipos dos Grupos Itabira (Formação Gandarela) e Piracicaba (Formações Fecho do Funil e Cercadinho) presentes no Supergrupo Minas.

##### 4.1.1 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas caracteriza uma sequência vulcanossedimentar do tipo *greenstone belt* sobreposta aos complexos metamórficos do QFe. Como supracitado, apresenta a seguinte ordem estratigráfica da base para o topo: Grupos Quebra Ossos, Nova Lima e Maquiné.

Trabalhos científicos como os de Van Acken *et al.* (2016) dissertam sobre o alto teor de Al/Ti existentes nos komatiitos do Grupo Quebra Osso. Além de evidenciar um empobrecimento incomum em elementos incompatíveis, baixo ETRL/ETRP, baixo Re/Os e variável  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ . Tal comportamento é justificado por uma multiplicidade de processos que ocorrem desde a erupção do magma, fusão parcial e segregação da fonte via ascensão e interação com o ambiente peridotítico, à potencial contaminação crustal e assinatura metamórfica (Endo *et al.* 2020).

Zucchetti (1998) trabalhou com a geoquímica de ETR dos litotipos do Grupo Nova Lima. Os metabasaltos de fundo oceânico (tipo P-MORB) foram divididos em cinco populações, considerando-se o grau de evolução magmática, sendo a população I oriunda de uma fusão parcial de fonte mantélica tipo pluma. As demais populações mais diferenciadas teriam se formado por diferenciação

fracionada a partir da população I. Já os basaltos foram classificados como de natureza tholeítica, possuindo um alto teor de magnésio.

Estudos geoquímicos sobre formações ferríferas bandadas e cherts do *greenstone belt* Rio das Velhas foram realizados por Araújo & Lobato (2019). Essas litologias apresentaram significativas anomalias positivas de európio e baixas concentrações de elementos imóveis. Tal situação sugeriu uma elevada percolação de fluidos hidrotermais e uma baixa contribuição detrítica durante suas formações. Em relação às formações ferríferas, observaram-se alguns casos com anomalias positivas de európio e concentrações mais elevadas de alumínio, indicando uma contribuição maior detrítica durante sua formação (Araújo e Lobato 2019). Essa alta percolação de fluidos hidrotermais justificam o fato dessas litologias ocorrerem muitas vezes associadas a depósitos auríferos (Endo *et al.* 2020).

#### 4.1.2 Supergrupo Minas

Poucos são os estudos litogeoquímicos que descrevem as sequências sedimentares do Supergrupo Minas. Dentre os existentes, destacam-se com uma maior frequência os que visam retratar as sequências sedimentares químicas tais como as formações ferríferas bandadas metamorfizadas (itabiritos) e as rochas carbonáticas (Endo *et al.* 2020).

Segundo Dorr (1969), o Supergrupo Minas pode ser dividido em quatro grupos (Figura 3.3), compostos respectivamente por, dois grupos inferiores com formações predominantemente clásticas (Formações Moeda, Batatal, Morro Grande e Cambotas), separadas por uma provável discordância erosional; uma sobreposição gradacional composta de duas formações predominantemente de origem química ou bioquímica (Formações Cauê e Gandarela) e um grupo superior composto de formações clásticas (Formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro).

O Grupo Caraça encontra-se na base do Supergrupo Minas, e é composto pelas Formações Moeda e Batatal. Os conglomerados basais da Formação Moeda encontram-se associados com minerais de urânio (uraninita) e de ouro, possuindo concentrações elevadas de elementos traço (658 ppm de arsênio, 339 ppm de cromo, 79 ppm de urânio, 56 ppm de tório e 20 ppm de estrôncio) (Minter *et al.* 1990). Segundo Uhlein & Noce (2012), o ouro e o urânio possuem origem detrítica, assim como os sulfetos (piritas) também comuns nesses conglomerados. Eles apresentam como origem a intemperização e erosão das rochas fontes, embasamento cristalino e litologias do Supergrupo Rio das Velhas, sendo depositados através de sistemas flúvio-deltaicos no fundo de drenagens junto aos demais materiais sedimentares que deram origem a Formação Moeda (Villaça 1981). Destaca-se que a presença tanto de uraninita quanto de pirita no material indicam a baixa disponibilidade de oxigênio no ambiente durante sua sedimentação, considerando que são instáveis em ambientes oxidantes (Endo *et al.* 2020).

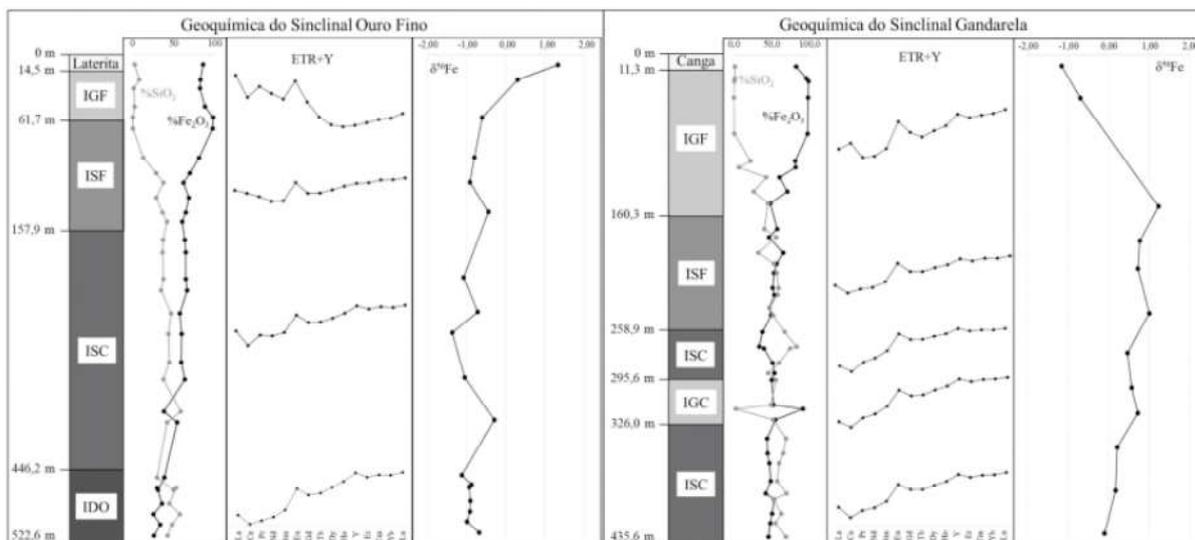
Leão *et al.* (2017) analisou os filitos da Formação Batatal em diferentes frentes de intemperismo, concluindo que o intemperismo físico prevalece sobre o químico sobre essa litologia.

O Grupo Itabira sobrepõe o Grupo Caraça e é caracterizado por sedimentação essencialmente química que resultou na formação de depósitos de grande importância econômica mundial (depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero) (Endo *et al.* 2020). Esses depósitos estão localizados em itabiritos da Formação Cauê e eles são similares geoquimicamente aos itabiritos correlativos do Paleoproterozoico de outras bacias ao redor do mundo (Alkmim 2014). Destaca-se que a variação da distribuição dos elementos químicos ao longo dos perfis itabiríticos se deve tanto à composição original da rocha, como à atuação de processos hidrotermais e ao enriquecimento supergênico (Alkmim 2014).

Mendes (2015) através de análises geoquímicas e isotópicas de itabiritos sugere que a deposição das BIFs ocorreu em ambiente marinho oxidado (oceano Minas), por meio da precipitação do ferro dissolvido proveniente de fluidos hidrotermais durante o Grande Evento de Oxidação (Great Oxidation Event – GOE). A autora afirma ainda que itabiritos provenientes de diferentes domínios deformacionais apresentam valores similares de  $\sum ETR+Y$  e de isótopos de ferro, indicando que o metamorfismo não afetou de forma efetiva a assinatura geoquímica das BIFs. Porém, a composição isotópica é diferenciada entre itabiritos em domínios de diferentes intensidades deformacionais, devido às diferentes características dos fluidos mineralizadores (Mendes 2015).

Segundo Alkmim (2014), o espectro de ETR para os itabiritos estudados, normalizados pelo PAAS (McLennan 1989), possuem características comuns como: i) enriquecimento dos ETRP em relação aos ETRL; ii) anomalias positivas de Eu e Y; iii) anomalias positivas ou negativas de Ce; iv) razões  $(Sm/Yb)_S < 1$  e  $(Eu/Sm)_S > 1$ . Na Figura 4.1 ilustra a variação geoquímica ( $\%Fe_2O_3$  e  $\%SiO_2$ ), isotópica ( $\delta^{56}Fe$ ) e dos espectros de ETR+Y encontradas em itabiritos da Formação Cauê.

Em seu trabalho, Alkmim (2014) sugere ainda que os protólitos dos itabiritos da Formação Cauê se formaram com a interação de diversas fontes: i) clástica; ii) hidrotermal; iii) vulcânica. Dentre as características químicas de fontes clásticas têm-se: i) alta concentração dos elementos Sc, Sr, Zr, Hf e Th; ii) correlação positiva entre os elementos-traço U, Ni e Cu com  $Al_2O_3$ . Já as características indicativas de presença de fonte hidrotermal são a fonte do ferro e a presença de anomalias positivas de Eu. E, finalmente, indicativos da presença de uma fonte vulcânica são: i) presença de stilpnomelana; ii) presença de celadonita em itabirito silicoso.



**Figura 4.1** - Variação geoquímica (%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e %SiO<sub>2</sub>), isotópica (δ<sup>56</sup>Fe) e dos espectros de ETR+Y normalizados pelo *Post Archean Australian Shale* (PAAS) da Formação Cauê nos Sinclinais Gandarela e Ouro Fino. Os litotipos mais alterados como itabirito goethítico friável (IGF) e itabirito silicoso friável (ISF), apresentam assinaturas distintas dos demais itabiritos (itabirito silicoso compacto (ISC), itabirito dolomítico (IDO) e itabirito goethítico compacto (IGC)), como enriquecimento do ferro em relação à sílica e perda da assinatura de ETR+Y da água do mar. Retirado de (Endo *et al.* 2020).

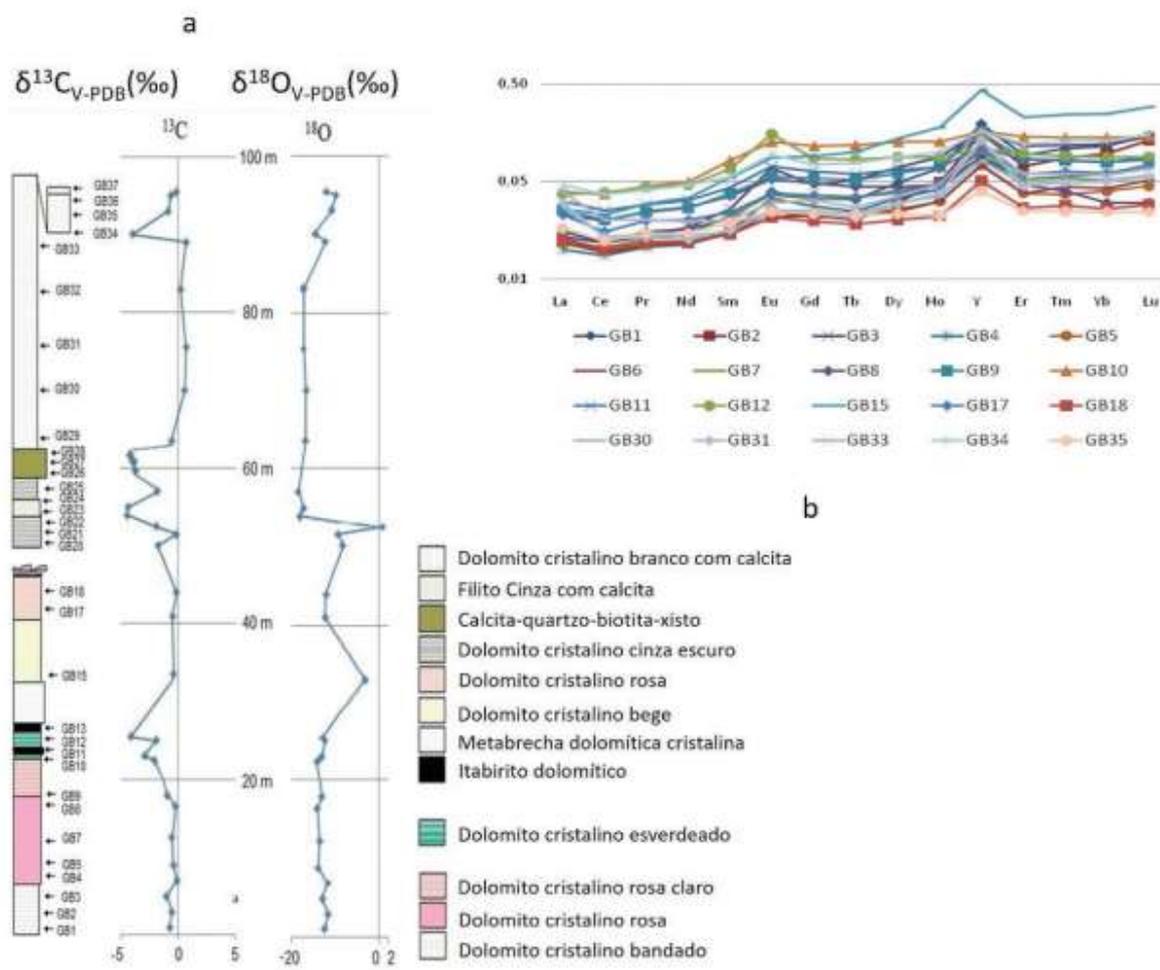
A Formação Gandarela e seus litotipos carbonáticos possuem como resultados geoquímicos concentrações de ferro que variam de 0,12 % a 3,69 %, de manganês entre 1.608 ppm e 16.339 ppm e de estrôncio entre 19 ppm e 977 ppm (Bekker *et al.* 2003). Vale ressaltar que os calcários apresentam as mais altas concentrações de estrôncio quando comparados com os dolomitos (Endo *et al.* 2020).

Bekker *et al.* 2003 afirmaram em seu trabalho que a diagênese e o metamorfismo podem afetar a composição isotópica de carbonatos, ao passo que a alteração meteorológica promove o aumento dos teores de Mn e Fe nos carbonatos, enquanto diminui seu conteúdo de Sr, resultando no uso generalizado de Mn / Sr ou Fe / Sr como um índice de alteração. No entanto, carbonatos Arqueanos e do início do Paleoproterozoico, especialmente dolomitos, são conhecidos por conter mais Fe e Mn do que carbonatos Fanerozoicos ou Neoproterozoicos, complicando a aplicação da razão Mn / Sr como um índice de alteração (Bekker *et al.* 2003).

As rochas carbonáticas analisadas nos trabalhos de Nogueira (2018) e Nogueira *et al.* (2019) podem ser correlacionadas com carbonatos Paleoproterozoicos de mesma idade (2.420 Ma) em outras partes do mundo. Do ponto de vista isotópico, em carbonatos da Formação Gandarela, os valores médios de δ<sup>18</sup>O variam de -13,5 ‰ a -6,0 ‰ e de δ<sup>13</sup>C, de -3,2 ‰ e +1,6 ‰ (Bekker *et al.* 2003, Nogueira *et al.* 2019).

Carvalho *et al.* (2011) sugerem que solos com elevado teor de Mn estão relacionados a três materiais de origem distintos dentro do QFe: itabiritos, dolomitos ferruginosos e serpentinitos. E que dentre solos que possuem teores de Mn na fração terra fina extraordinariamente elevados, estão

aqueles relacionados aos dolomitos ferruginosos da Formação Gandarela. Os autores identificaram ainda diversos minerais de Mn na fração argila dos solos, sem quaisquer pré-tratamentos de concentração, representados por todoroquita, litioforita e, ainda, pirolusita.



**Figura 4.2** - (a) Coluna estratigráfica da pedreira Bemil (Formação Gandarela), juntamente com as curvas isotópicas de carbono e oxigênio. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (-18,5 ‰ a 0,87 ‰) mostram maior dispersão em comparação com os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (-4,46 ‰ a 0,69 ‰). (b) Diagrama mostrando o padrão dos ETR+Y normalizado pelo Post Archean Australian Shale (PAAS) para as amostras da pedreira Bemil, que mantém o padrão dos ETR+Y da água do mar, caracterizado pelo baixo somatório de ETR, depleção uniforme dos ETR leves, anomalia negativa de Ce, anomalia positiva de La e elevada razão Y/Ho. Retirado de (Endo *et al.* 2020) e baseado nos trabalhos de Nogueira (2018) e Nogueira *et al.* (2019).

O Grupo Piracicaba possui rochas metassedimentares de origem marinha e deltaica, transgressiva a regressiva (Endo *et al.* 2020). Análises geoquímicas da Formação Cercadinho mostram arenitos ferruginosos com até 95 % de  $\text{SiO}_2$  e até 12,3 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  associados a filitos ferruginosos (parte basal da formação), contendo grandes quantidades de cianita, sendo considerados ricos em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e possuindo também lentes de carbonatos dolomíticos (Bekker *et al.* 2003, Endo *et al.* 2020). Segundo Bekker *et al.* (2003), os dolomitos lenticulares desta formação possuem composição de Mn

altamente variável (279 - 1.992 ppm), teor de Fe entre 0,85 a 9,22% e Sr variando de 16 a 69 ppm, além de uma faixa estreita de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (-9,9 ‰ a -8,0 ‰) e de  $\delta^{13}\text{C}$  (+3,3‰ e +5,4 ‰).

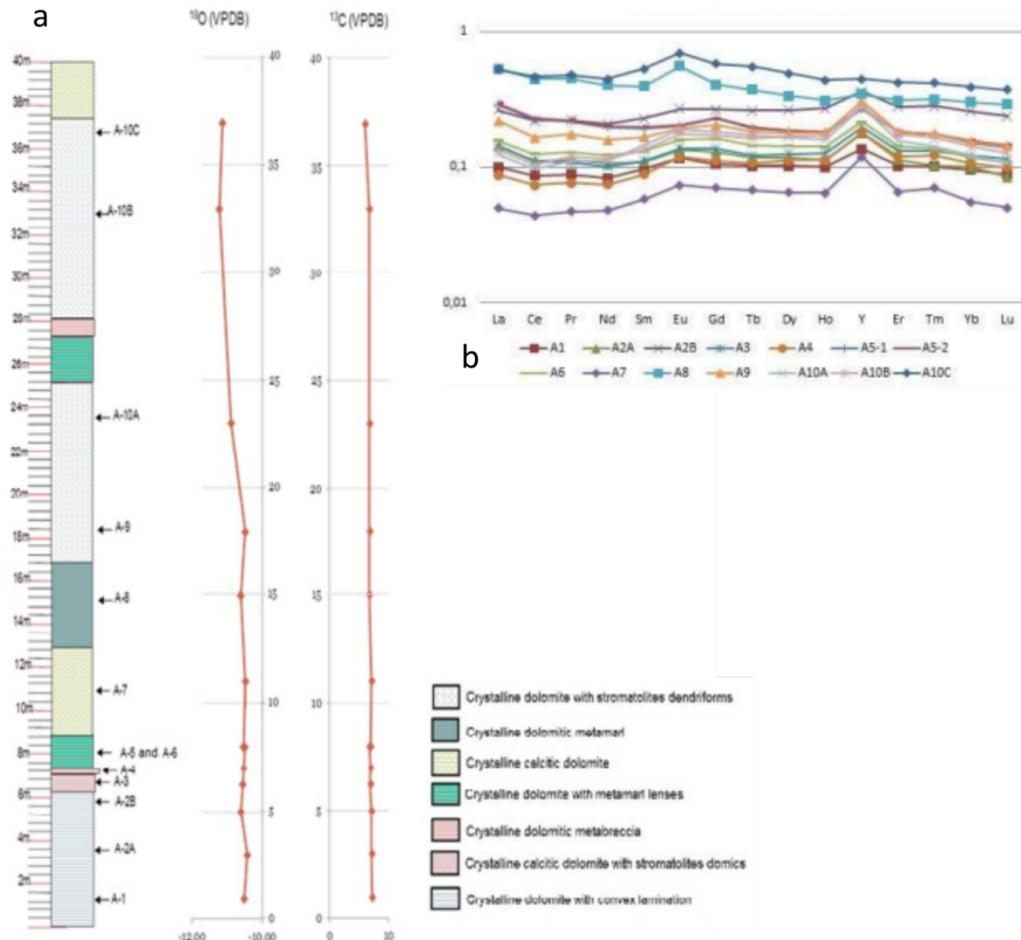
Bekker *et al.* (2003) dissertam que a Formação Fecho do Funil possui dolomitos com Mn altamente variável (926 - 3.242 ppm), teores de Fe entre 0,26 a 5,87% e Sr entre 5 a 111 ppm. Além disso, para esses dolomitos, os valores de isótopos de oxigênio variam de -12,3 a -9,1 ‰, ocorrendo com valores de  $\delta^{18}\text{O}$  predominantemente acima de -11 ‰, e os isótopos de  $\delta^{13}\text{C}$  variam de 5,6 a 7,4 ‰.

Os filitos e carbonatos da Formação Fecho do Funil têm valores de  $^{13}\text{C}_{\text{org}}$  altamente variáveis, variando de -24,8 a -14,4 ‰ e baixo conteúdo de carbono orgânico total (TOC) (0,04 - 0,18 mgC / g de amostra) (Bekker *et al.* 2003). A autora afirma que, em contraste, os filitos da Formação Barreiro possuem um teor de TOC muito maior (17,8 mgC / g de amostra) e valor de  $^{13}\text{C}_{\text{org}}$  de -26,6 ‰.

Nogueira *et al.* (2017) realizaram análises geoquímicas sistemáticas de elementos maiores, traço, terras raras e isótopos de carbono e oxigênio em rochas dolomíticas da Formação Fecho do Funil (Figura 4.3), obtendo como resultado ETR normalizados ao PAAS com padrões quase planos para ETR leves e presença de depleções para ETR pesados. Anomalias de La ligeiramente positivas e anomalias negativas de Ce também foram observadas.

Ademais, correlações positivas de valores  $\Sigma\text{ETR}$  com  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Fe, Ni, Cr, Th e Sc foram levantadas e caracterizam padrões de ETR não semelhantes à água do mar, sugerindo que os dolomitos podem ter incorporado materiais terrígenos durante sua deposição (Nogueira *et al.* 2017). Isso é confirmado pela correlação negativa de  $\Sigma\text{ETR}$  com CaO. Além disso, a correlação positiva de Eu com Zr, Th e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontrada nessa formação afirma uma influência não diagenética no comportamento dos ETR. As análises mostram ainda valores de  $\delta^{18}\text{O}$  maiores que -11 ‰, consistentes com muitas outras sucessões de carbonato Pré-Cambriano, sugerindo que as rochas da Formação Fecho do Funil sofreram pouca troca pós-deposicional (Nogueira *et al.* 2017).

A Formação Fecho do Funil gradua regressivamente para os quartzitos da Formação Taboões que possuem cerca de 98,5 % de  $\text{SiO}_2$  (Endo *et al.* 2020, Romano 1989). Já a Formação Barreiro é composta por filitos escuros e filitos carbonosos/grafíticos, com carbono orgânico total chegando a 4,4% (Nogueira *et al.* 2017), e possuindo piritas em sua composição que refletem deposição em ambiente redutor (Endo *et al.* 2020).



**Figura 4.3** - (a) Coluna estratigráfica da pedreira Cumbi (Formação Fecho do Funil), juntamente com as curvas isotópicas de carbono e oxigênio. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (-10.92 ‰ to -10.42 ‰) mostram menor dispersão em comparação com os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (+6.02 ‰ to + 7.23 ‰). (b) Diagrama mostrando o padrão dos ETR+Y normalizado pelo *Post Archean Australian Shale* (PAAS) para as amostras da pedreira Cumbi. Modificado de Nogueira *et al.* (2017).

### 4.1.3 Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real é formado pelos Grupos Sabará e Itacolomi, estando separados por meio de um contato discordante angular e erosivo (Endo *et al.* 2020). Através de estudos geoquímicos dos litotipos do Grupo Sabará, Guitarrari (1999) classificou os metassedimentos como sendo de origem félsica e os turbiditos como detentores de arenitos sódicos e ferro-magnesianos potássicos. Em relação aos pelitos, observaram-se anomalia negativa de európio e enriquecimento em ETRL, enquanto que nas grauvas não se verificou a anomalia negativa de európio. Características geoquímicas das rochas presentes nas áreas-fonte justificam esses comportamentos (Endo *et al.* 2020, Guitarrari 1999).

O Grupo Itacolomi é caracterizado por possuir vários maciços quartzíticos distribuídos ao longo das bordas sul e leste do Quadrilátero Ferrífero (Dorr 1969). Ele apresenta intensidades e estilos

variados de deformação e elevado grau de complexidade. Este fato tem dificultado os estudos geoquímicos em suas litologias, justificando a pouca quantidade de trabalhos abordando o assunto.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS FÍSICOS

---

#### 5.1 APRESENTAÇÃO

O presente capítulo abordará os resultados referentes às descrições pedológicas de detalhe realizadas nas 31 amostras coletadas em 26 pontos ao longo do Sinclinal Dom Bosco. Buscou-se descrever as amostras de solos com base em suas características morfológicas proeminentes, ou seja, aquelas observáveis através do tato e da visão. Dentre os parâmetros físicos analisados, destacam-se: coloração (Carta de Munsell), caracterização textural, caracterização estrutural (tipo, classe/tamanho, grau de desenvolvimento), porosidade e consistência (quando seca, úmida e molhada).

Todos os dados oriundos da classificação amostral foram organizados em uma tabela (disponível no Apêndice A) para sua sistematização e interpretação. O objetivo maior dessa descrição foi o de identificar padrões de disposição física comuns entre todos os materiais, utilizando-se como critério inicial de busca a pressuposta coloração da “borra de café”, uma vez em que há poucas informações descritivas sobre o solo “borra de café” na literatura. Posteriormente, com base nas similaridades dos parâmetros físicos encontradas (Apêndice A), propôs-se uma classificação pedológica macroscópica preliminar para o solo “borra de café” que será detalhada nos itens a seguir.

Dessa forma, as amostras selecionadas neste capítulo (10 amostras) foram consideradas como representantes do solo “borra de café”. As demais amostras, por comporem variantes comuns encontradas na região, não foram discutidas.

Diante da descrição de algumas amostras como sendo exemplares de solo “borra de café”, sugere-se no Capítulo 6 a classificação, agora microscópica desse solo, abordando aspectos de sua composição química e concluindo a pormenorização desse tipo de solo.

#### 5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS

##### 5.2.1 Disposição geral do solo “borra de café”

Dentre as 31 amostras analisadas macroscopicamente, 10 foram definidas como sendo representantes do solo “borra de café” e podem ser observadas na Tabela 5.1 abaixo. Destaca-se que as amostras foram coletadas predominantemente em regiões de drenagens (Figura 2.1), o que pode justificar a ocorrência de processos de alteração pedológicas influenciados por fatores combinados, no caso, os geomorfológicos/topográficos e os climáticos, refletindo a consequente disposição

geoquímica desse solo. O mapa da Figura 5.1 permite a visualização da distribuição espacial desses pontos amostrais de interesse.

Comparando-se essa disposição dos pontos amostrados classificados como solo “borra de café” com as litologias do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2020) (Figura 5.1) observa-se que os litotipos que os originaram advêm, cerca de 50% das amostras oriundas de litotipos da Formação Gandarela, 30% da Formação Cercadinho e 20% de litotipos da Formação Fecho do Funil.

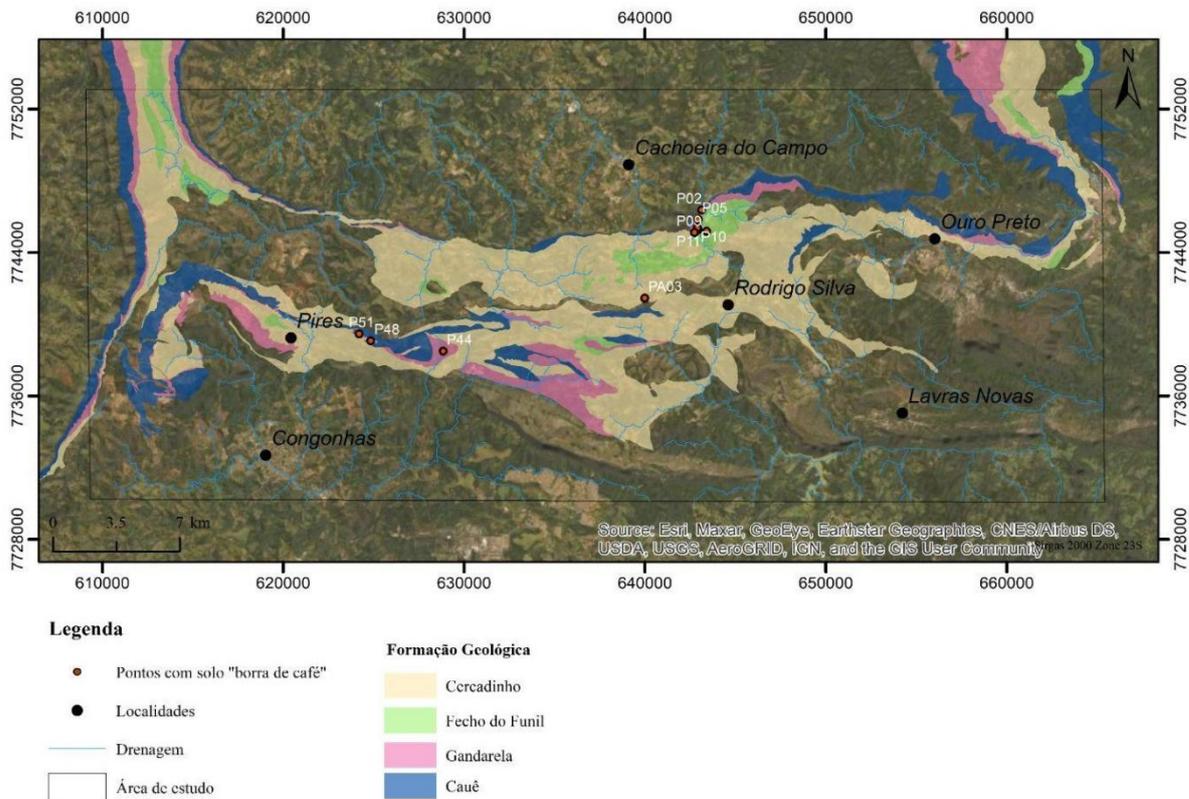
**Tabela 5.1** - Amostras classificadas como solo “borra de café”. Destaque para posicionamento em zonas de drenagem e para o tipo de litologia aflorante no local (material parental).

Ponto	Região de drenagem	Litologia do saprólito
P02	sim	Fm. Gandarela
P05	sim	Fm. Gandarela
P09	sim	Fm. Cercadinho
P10	sim	Fm. Cercadinho
P11	sim	Fm. Fecho do Funil
P44	sim	Fm. Gandarela
P48	não	Fm. Gandarela
P51	não	Fm. Gandarela
PA3	sim	Fm. Cercadinho
P64	sim	Fm. Fecho do Funil

Diante disso, desconsidera-se apenas litologias de uma formação geológica apenas como detentora de materiais parentais para esses solos. Contudo, destaca-se ainda a constante presença de litologias ferruginosas da Formação Cauê nas proximidades desses pontos de coleta que influenciam a formação desses solos através da contribuição e fornecimento de elementos químicos como ferro e manganês para sua composição. Os aspectos geoquímicos de formulação desses solos serão tratados no capítulo a seguir.

Os solos “borra de café” se apresentam como um material pedológico acastanhado variando de nuances mais claras a mais escuras. É comum encontrar em seu interior a presença de pequenas estruturas nodulares (concreções minerais) milimétricas de significativa resistência à compressão manual e que possuem tonalidade castanho-amareladas a castanho-avermelhadas, com provável composição de Fe/Mn/Al, caracterizando óxidos desses elementos. A presença de tais elementos é muito comum nesses solos, sendo possivelmente nódulos ferro-manganesíferos. Além disso, pode-se observar também fragmentos centimétricos subarredondados a subangulosos alterados, sendo alguns bem rígidos e medianamente densos - possivelmente hematíticos e itabiritos se comportando como resistatos imersos nesses solos. A presença de fragmentos de filitos prateados imersos nesses solos

também é observada, o que pode justificar a composição argilosa dos solos “borra de café” ao funcionar como fonte de argilominerais como filossilicatos.



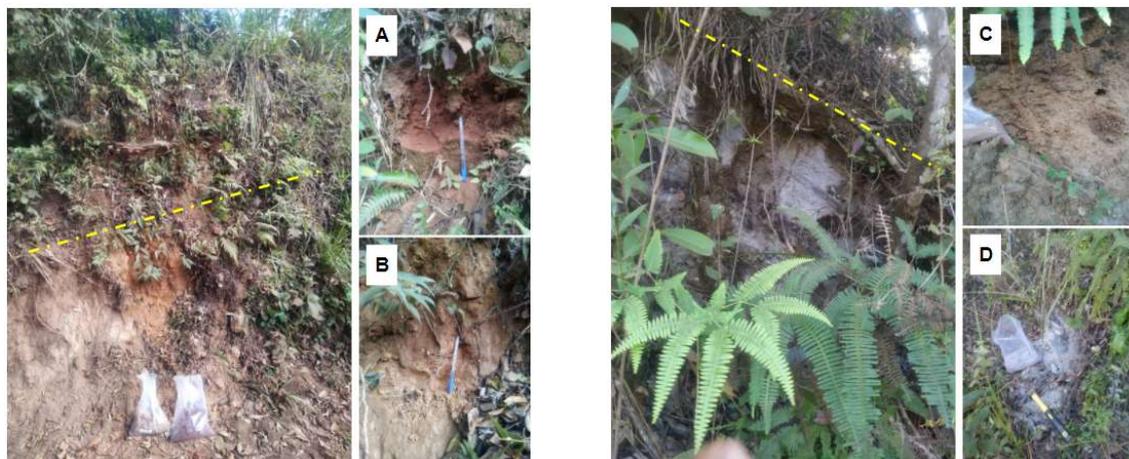
**Figura 5.1** - Mapa com localização dos pontos visitados e amostrados ao longo do Sinclinal Dom Bosco que foram classificados como solos “borra de café”. Fonte: Google Satellite, EPSG:31983 - SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S.

A disposição dos solos “borra de café” em campo é ilustrada na Figura 5.2, em que se observam as características descritas típicas desse material pedológico. Em alguns pontos em que foi possível coletar amostras do topo e da base do perfil pedológico, apenas as porções de topo foram classificadas como solo “borra de café” - no caso, Ponto 09, Ponto 11, Ponto 64 (Figura 5.3). As porções amostradas basais foram consideradas como saprólito desse solo, ou seja, como seu material parental e não foram utilizadas para realizar sua caracterização geoquímica, e sim, apenas a correlação parental (Capítulo 6).

Dentre os litotipos predominantes nos saprólitos (Horizontes C) desses solos destacam-se filitos prateados, itabiritos e rochas carbonáticas. Na Figura 5.3 observa-se um saprólito de composição carbonatítica (item B) e de composição filítica (itens D e F). Entende-se que os solos (Horizontes B) foram formados pela infiltração e percolação de água advinda das drenagens da região estudada e que associadas a disposição do relevo e ao clima exerceram fatores intempéricos químicos e físicos que permitiram a mobilização e precipitação de elementos químicos mais voláteis, resultando na formação desse tipo de solo.



**Figura 5.2** - Ilustração do solo “borra de café” *in situ* ao longo do Sinclinal Dom Bosco. A-P02, B-P05, C-P09, D-P10, E-P11, F-P44, G-P48, H-P51, I-P64, J-PA3.





**Figura 5.3** - Disposição de perfis pedológicos em que se observa no topo a presença do solo “borra de café” e na base um material parental. Topo e base encontram-se demarcados pela linha amarela. Em A, C e E tem-se os topos dos perfis e em B, D e F as bases. A e B caracterizam o Ponto 09 visitado em campo; C e D o Ponto 11; e E, F o Ponto 64.

A seguir serão detalhadas mais características descritivas das amostras classificadas como sendo de solo “borra de café” e, no capítulo seguinte, a correlação dessa descrição com a classificação agora geoquímica desse material.

### 5.2.2 Coloração do solo “borra de café”

A cor é uma propriedade física mundialmente utilizada na classificação dos solos e na diferenciação dos horizontes pedológicos. A cor do solo “borra de café” foi determinada através da comparação visual deste material com a Carta de Munsell, ferramenta baseada no sistema de cores de Munsell que resulta em uma notação na forma de dígitos para representar uma determinada tonalidade.

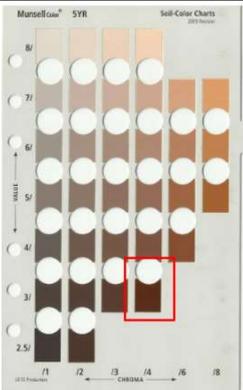
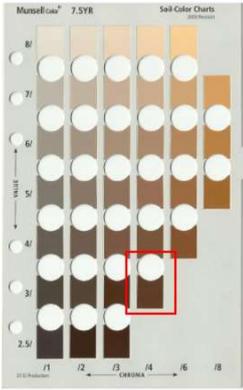
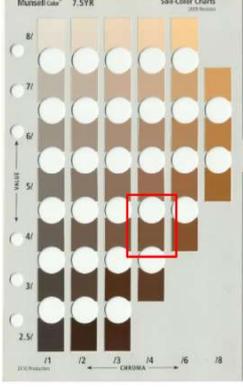
O resultado dessa classificação é ilustrado na Tabela 5.2 em que se é possível observar nitidamente a semelhança entre as nuances de cores do solo “borra de café” presentes na região estudada. A Figura 5.4 ilustra resumidamente as informações levantadas acerca da coloração desse solo, tais como Matiz, Valor e Cromo característicos.

O Matiz ou Espectro Dominante da cor investigada na maioria das amostras definidas como sendo desse solo é o amarelo-avermelhado (YR), típico de solos existentes em zonas tropicais e subtropicais. Ele é 60% representado pelo Matiz 7.5YR, seguido do 5YR com 30% e do 2.5YR com 10%.

Em relação ao Valor, ou seja, termo correspondente ao brilho ou à tonalidade da cor, os resultados encontrados nas amostras de solo “borra de café” foram de: 3 (40% das amostras), de 4 (20% das amostras), de 5 (20% das amostras), de 2.5 (10% das amostras) e de 6 (10% das amostras). Observa-se que os Valores mais representativos encontrados variam entre os inteiros existentes no intervalo de 3 a 5. De modo que quanto menor o Valor obtido, mais escura é a cor do solo.

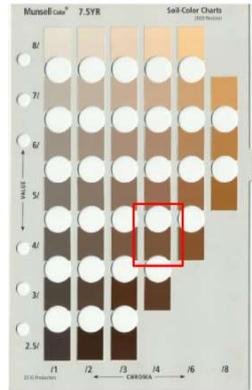
Por fim, o Cromo ou Intensidade da cor predominante é o 4, presente em 50% das amostras. O segundo maior Cromo mapeado é o 6, com 20%, seguido de 2, 3 e 8, todos representados com 10% das amostras levantadas como sendo desse solo “borra de café”.

**Tabela 5.2** - Nomeação da coloração das amostras classificadas como solo “borra de café” com base na Carta de Munsell. Destaque para a semelhança entre as nuances dessas cores ilustradas na coluna Foto.

Ponto	Cor Notação de Munsell	Carta de Munsell	Foto
P02	5YR 3/4		
P05	7.5YR 3/4		
P09	7.5YR 4/4		

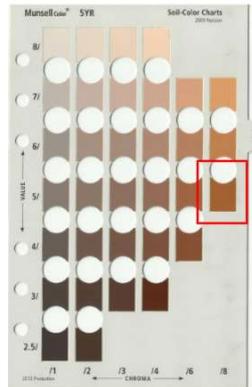
P10

7.5YR 4/4



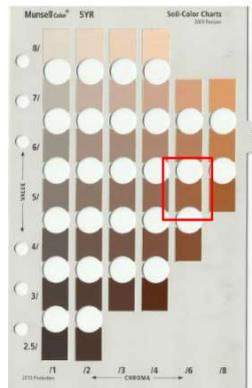
P11

5YR 5/8



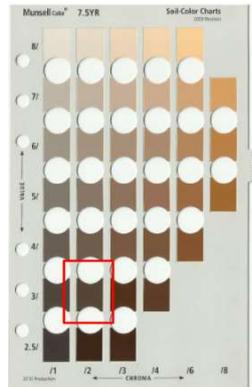
P44

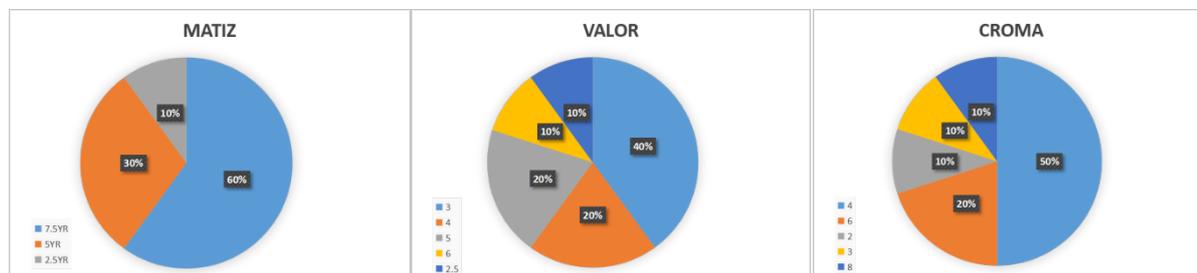
5YR 5/6



P48

7.5YR 3/2





**Figura 5.4** - Ilustração simplificada das informações de Matiz, Valor e Croma presentes na classificação da coloração dos solos amostrados definidos como sendo do tipo “borra de café”.

Diante das informações mapeadas, tem-se que a notação de Munsell que mais representa a coloração típica dos solos “borra de café” é a 7.5YR 3/4 (*dark brown*). Ela encontra-se destacada na Figura 5.5 retirada da Carta de Munsell.



**Figura 5.5** - Ilustração retirada da Carta de Munsell destacando classificação de solos que mais representa a coloração dos solos “borra de café” (7.5YR 3/4).

### 5.2.3 Classificação textural do solo “borra de café”

A textura de um solo constitui-se numa das características mais estáveis do solo e representa a distribuição das partículas do solo quanto ao tamanho. A grande estabilidade faz com que a textura seja considerada elemento de grande importância na descrição, identificação e classificação do solo. A textura confere alguma qualidade ao solo, no entanto, sua avaliação apresenta conotação prioritariamente quantitativa.

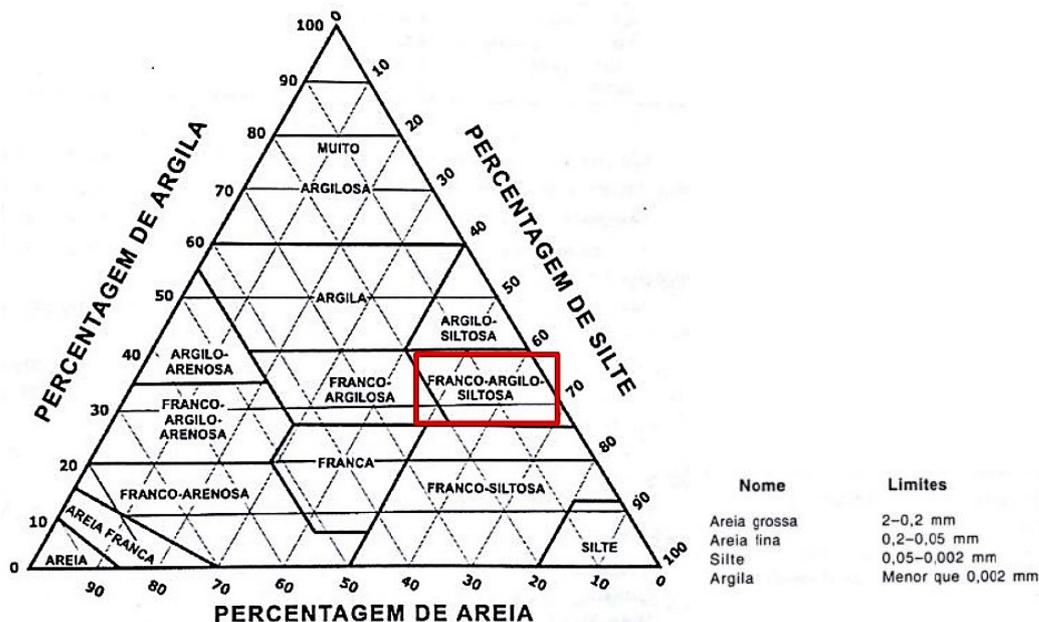
Areia, silte e argila são as três frações texturais de um solo que apresentam amplitudes de tamanho variáveis em virtude do sistema de classificação adotado. Existem diversos sistemas de classificação, todos baseados em critérios arbitrários na separação dos tamanhos das diversas frações. Contudo, o considerado no presente trabalho foi o Sistema Norte Americano, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Em relação ao solo “borra de café”, o conteúdo argiloso presente é facilmente identificado (Tabela 5.3), o que torna esses solos representantes do Horizonte B textural, caracterizado como um horizonte mineral subsuperficial de textura no máximo franca e que possui uma maior porcentagem de argila do que o horizonte acima dele, seja um Horizonte A ou E, bem como pode ou não ser maior que o do horizonte C abaixo dele.

**Tabela 5.3** - Classificação textural das amostras identificadas como solo “borra de café”.

Ponto	Classificação Textural
P02	franco-argilo-siltosa
P05	franco-argilo-siltosa
P09	franca
P10	franco-argilo-siltosa
P11	argilo-siltosa
P44	franco-argilo-siltosa
P48	franco-argilo-siltosa
P51	franco-argilo-siltosa
PA3	franco-argilo-siltosa
P64	argilosa

Diante das informações apresentadas na Tabela 5.3, tem-se que a classificação textural mais representativa dos solos “borra de café” é a franco-argilo-siltosa, ou seja, moderadamente fina, ocorrendo em 70% das amostras. Ela encontra-se destacada na Figura 5.6 e caracteriza solos com 40-70% de silte, 30-40% de argila e 0-20% de areia.



**Figura 5.6** - Ilustração retirada do Soil Survey Manual (Estados Unidos 1993) destacando a classificação textural que mais representa a coloração dos solos “borra de café” (franco-argilo-siltosa).

### 5.2.4 Classificação estrutural do solo “borra de café”

O termo estrutura refere-se ao arranjo das partículas primárias do solo em agregados ou unidades estruturais. A disposição dos poros e agregados, definida pela estrutura do solo, possui grande influência sobre movimento de água, transferência de calor, aeração e porosidade. Desmatamento, aração, cultivo, tráfego, drenagem, calagem e adição de material orgânico, são

exemplos de práticas que afetam diretamente a estrutura do solo principalmente nos horizontes superficiais.

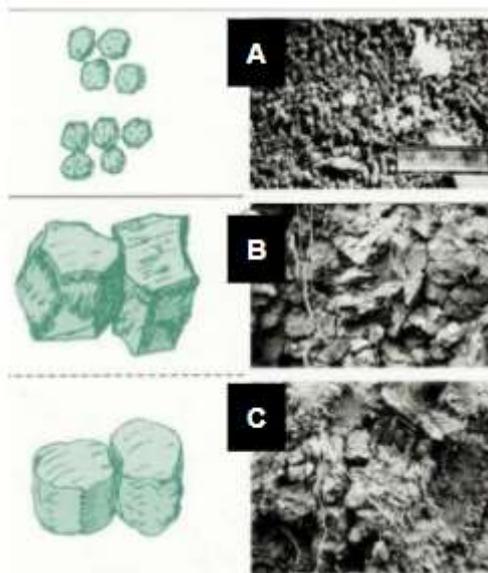
Diferentes tipos de unidades estruturais ocorrem nos solos, muitas vezes esta diferenciação é observada entre horizontes de um mesmo perfil de solo. A estrutura do solo é classificada de acordo com a forma, o tamanho e o grau de desenvolvimento das unidades estruturais.

No solo “borra de café”, a forma estrutural predominante encontrada foi a granular, ocorrendo em cerca de 60% das amostras levantadas como sendo desse solo, seguida da forma como blocos subangulares e angulares (40%). A Figura 5.7 ilustra a disposição das formas dessas estruturas, sugerindo como seria seu comportamento observado em campo.

A estrutura granular consiste em unidades estruturais esferoidais ou grânulos livres em um arranjo pouco compacto (Figura 5.7 A). Quando estas unidades estruturais são muito porosas, são denominadas grumos. Estrutura granular e em grumos são características de horizontes mais superficiais, ou seja, mais próximos ao Horizonte A, particularmente aqueles com alto teor de matéria orgânica.

As unidades estruturais em forma de blocos são irregulares e poliédricas (Figura 5.7 B e C). Os blocos não são formados individualmente, mas em conjunto com blocos adjacentes. Quando as unidades estruturais apresentam faces planas e ângulos agudos na maioria dos vértices são chamados blocos angulares. Quando as unidades estruturais apresentam mistura de faces arredondadas e planas com muitos vértices arredondados, são chamados blocos subangulares. Estes tipos de estrutura são normalmente encontrados no Horizonte B, onde promovem boa drenagem e aeração.

Na descrição da estrutura do solo, não é observada somente a forma das unidades estruturais, mas também o tamanho (pequeno, médio ou grande) e o grau de desenvolvimento (forte, moderado, ou fraco). No caso do solo “borra de café” mapeado, os tamanhos observados variam de pequeno a grande e o grau de desenvolvimento referente à manifestação das condições de coesão dentro e fora dos agregados é tido como majoritariamente fraco em 80% das amostras desse solo.



**Figura 5.7** - Ilustração do modo de ocorrência das formas estruturais existentes no solo “borra de café”. Os desenhos evidenciam suas características essenciais e as fotos sugerem sua aparência no campo. Modificado de Oliveira *et al.* (2010). Em A observa-se uma estrutura com forma granular, e em B e C, com forma de blocos, respectivamente, angulares e subangulares.

### 5.2.5 Consistência do solo “borra de café”

Consistência é uma propriedade que reflete as forças de coesão e de aderência, presentes nos solos sob diferentes graus de umidade. A massa do solo, quando molhada, seca ou úmida, apresenta diferentes resistências quando manuseada. A Tabela 1.2 detalha a forma como realizou-se a descrição da consistência das amostras de solos estudadas.

Para o solo seco o parâmetro analisado foi a dureza, que é a resistência da amostra ao se comprimi-la com os dedos. Nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café”, classificou-se as consistências variando entre macia, quando a amostra desfaz-se entre os dedos, à dura, quando a amostra é moderadamente resistente à pressão, ou seja, dificilmente quebrável entre os dedos. Destaca-se que nesse solo, quando observado a seco, predomina-se a consistência ligeiramente dura (50% das amostras) caracterizada como sendo fracamente resistente à pressão e facilmente quebrável entre o polegar e o indicador.

Para o solo úmido observa-se a friabilidade, que caracteriza a facilidade de ruptura da massa ao ser comprimida, definindo-se consistências soltas, friáveis e firmes. O solo “borra de café”, quando úmido, demonstra-se predominantemente (50% das amostras observadas) com comportamento muito friável, ou seja, o material do solo esboroa-se com pressão muito leve, e agrega-se por compressão posterior.

O manuseio das amostras quando molhadas permite determinar a plasticidade e a pegajosidade (ou aderência) (Figura 1.8). O solo com grande plasticidade é aquele que permite o seu modelamento

em rolos finos e sua compressão, sem que haja ruptura; enquanto os solos não plásticos serão aqueles que esfarelam-se ao serem modelados, ocorrendo os estados intermediários (ligeiramente plástico e plástico). Já a pegajosidade é definida pelo grau de aderência do material ao ser comprimido entre os dedos polegar e indicador. Ao se afastar os dedos percebe-se a maior ou menor resistência do material comprimido, caracterizando amostras não pegajosas, ligeiramente pegajosas, pegajosas ou muito pegajosas. Quando molhados, os solos “borra de café” comportam-se majoritariamente como ligeiramente plásticos e ligeiramente pegajosos (50% das amostras), apresentando-se também com plásticos e pegajosos em 40% das amostras observadas desse solo.

Resende *et al.* (2007) observam que a fração argila exerce um importante controle na consistência, pois quanto mais argiloso o solo, maior a expressão das forças de coesão e adesão. E que altos teores de silte e areia muito fina também exercem controles importantes, favorecendo o encrostamento da superfície. Observa-se essa influência da presença significativa da fração argila na classificação de consistência obtida para os solos “borra de café”, uma vez que o material se deforma facilmente e adere a ambos os dedos após cessar a pressão imposta.

Para o autor, a consistência do solo tem implicações diretas em seu manejo. Solos muito plásticos e pegajosos só podem ser trabalhados em uma amplitude estreita de umidade. Já os solos de boa friabilidade apresentam condições melhores para aração (Resende *et al.* 2007).

# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS GEOQUÍMICOS

---

### 6.1 APRESENTAÇÃO

Esta seção contempla os resultados das análises geoquímicas das 10 amostras de solos coletadas ao longo do Sinclinal Dom Bosco classificadas como sendo de solo “borra de café”, abordando-se a quantificação e interpretação acerca das concentrações dos vários elementos obtidos (Al, Fe, Mn, Ca, K, Mg, Na, Zr, P, S, Ti, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Pb, Th). Os resultados obtidos através da análise de ICP-OES e ICP-MS estão ilustrados, respectivamente, no Apêndice B e C.

Inicialmente, realizou-se a comparação do comportamento dos diversos elementos entre si através de uma análise estatística descritiva de seus teores (Tabela 6.1), e também por meio do cálculo de correlação lineares entre os elementos. Para a manutenção da confiabilidade e da representatividade dos resultados, apenas as amostras que apresentaram digestão total na etapa laboratorial foram utilizadas no trabalho. Ademais, em pontos classificados como sendo de solo “borra de café” e que possuíam informações completas do perfil pedológico, utilizou-se apenas as informações químicas de seu topo, uma vez que topo e base apresentaram informações distintas para a elucidação do comportamento químico desse solo.

Os dados geoquímicos referentes aos elementos maiores, menores, traço e terras raras (ETR) estão dispostos na forma de tópicos com intuito de serem retratados com maior detalhe e são apresentados a seguir. Ao fim desta seção, será feita uma breve discussão e conclusão referente aos resultados classificatórios investigados sobre as ocorrências de solo “borra de café”.

### 6.2 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DAS AMOSTRAS

A caracterização do conteúdo elementar (elementos maiores, menores, traço e terras raras) de solos e sedimentos oriundos de rochas carbonáticas é particularmente útil, uma vez que podem ser usados para auxiliar na interpretação do ambiente deposicional, das condições oceânicas paleo-redox e dos processos diagenéticos. Segue abaixo a discussão geoquímica acerca das amostras classificadas como sendo de solo “borra de café”.

#### 6.2.1 Comparação do comportamento dos diversos elementos entre si

A análise estatística descritiva pode ser usada como uma ferramenta para auxiliar na descrição e sumarização do conjunto de dados, e também na seleção de variáveis para a caracterização do solo. Esta ferramenta foi inicialmente utilizada com intuito de realizar uma análise exploratória dos dados

obtidos através das análises químicas. Esta abordagem é eficaz para estudar solos, sedimentos e amostras de água.

Diante disso, com base nos teores geoquímicos (mg/kg) encontrados para os pontos visitados em campo com solo “borra de café”, foi feita uma caracterização estatística inicial buscando entender o comportamento dos elementos químicos analisados (Tabela 6.1). Foram levantados os seguintes parâmetros: número de amostras, média aritmética, erro padrão, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valores de quartis (25% e 75%), amplitude interquartil, intervalo com valores mínimos e máximos.

Valores identificados como N/A, ou seja, “não se aplica” se referem a elementos químicos (Bi, Cd, Mo e Sb) que durante a análise química possuíram seus valores majoritariamente abaixo do limite de detecção e por isso se mostraram inviáveis para o estudo estatístico.

Para entender o comportamento dos dados (sejam eles discretos ou contínuos) de uma forma mais precisa, buscou-se estudar a dispersão de dados por meio de ferramentas que complementam uma análise geral como o desvio padrão, o coeficiente de variação e o intervalo interquartil.

O desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados. Ou seja, o desvio padrão indica o quanto um conjunto de dados é uniforme. Um desvio padrão grande significa que os valores amostrais estão bem distribuídos em torno da média, enquanto que um desvio padrão pequeno indica que eles estão condensados próximos da média. Em poucas palavras, quanto menor o desvio padrão, mais homogêneo é o conteúdo amostral. Diante disso, os elementos com distribuição química mais homogêneas foram: As, Fe, S, Er, Tm, Yb, Lu e U. O critério adotado para a seleção foi o de considerar valores menores que a metade da média aritmética obtida.

O coeficiente de variação (CV), também conhecido como desvio padrão relativo, é uma medida padronizada de dispersão de uma distribuição de probabilidade ou de uma distribuição de frequências. Valores de CV baixos correspondem a uma distribuição espacialmente homogênea, enquanto valores de CV altos indicam uma distribuição não homogênea na área de estudo. Diante disso, os elementos com distribuição química mais homogêneas observados foram: As, Fe, S, Ho, Er, Tm, Yb, Lu e U. O critério adotado para a seleção foi o de considerar valores com dispersão média a baixa, ou seja, com CVs menores que 40%.

**Tabela 6.1** - Análise estatística descritiva dos elementos químicos encontrados nas 10 amostras de solos classificados como sendo de “borra de café”. Não foram inseridos os resultados dos elementos Bi, Cd, Mo e Sb por não possuírem dados amostrais acima do limite de detecção.

Elemento (mg/kg)	Amostras	Média Aritmética	Erro Padrão	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Quartil 1 (25%)	Quartil 3 (75%)	Amplitude Interquartil (IQR)	Mínimo	Máximo
As	6	29.29	1.16	29.87	2.85	0.10	29.07	31.03	1.96	23.93	31.87
Ba	10	503.30	136.82	312.71	432.65	0.86	255.75	587.06	331.32	170.29	1604.49
Co	10	31.05	8.07	24.37	25.52	0.82	16.55	34.42	17.87	8.54	95.35
Cr	10	69.68	12.46	62.09	39.40	0.57	35.52	95.06	59.54	32.26	142.93
Cu	10	60.83	18.73	41.95	59.24	0.97	24.64	68.13	43.49	8.51	203.89
Li	10	66.04	39.29	14.52	124.26	1.88	10.44	24.83	14.39	4.76	396.41
Ni	8	140.32	62.70	64.56	177.33	1.26	48.90	127.19	78.29	30.14	553.24
Sc	10	8.46	1.80	6.56	5.68	0.67	3.93	13.10	9.17	3.15	18.59
Sr	10	36.72	12.13	17.47	38.36	1.04	5.37	59.42	54.05	2.36	103.40
V	10	77.20	12.58	69.99	39.79	0.52	42.29	106.54	64.25	36.73	149.67
Zn	10	149.68	58.71	68.80	185.67	1.24	37.31	183.08	145.78	14.03	595.03
Be	10	1.58	0.47	1.11	1.50	0.95	0.72	1.54	0.82	0.13	4.31
Mn	10	21988.2	5516.0	19032.3	17443.0	0.79	6883.8	35058.5	28174.7	3266.2	50601.0
Al	10	39942.3	8515.8	23595.4	26929.3	0.67	21063.0	65646.9	44583.9	17460.7	80684.2
Fe	10	238368.5	30353.6	273229.3	95986.4	0.40	166696.6	312182.6	145486.0	87888.0	355299.6
Ca	10	1893.3	1034.5	339.0	3271.3	1.73	271.6	1062.3	790.6	112.8	9747.3
K	10	9157.9	3719.5	2951.6	11762.1	1.28	1717.4	12704.2	10986.8	167.8	34222.2
Mg	10	2758.3	721.5	2050.7	2281.6	0.83	794.0	4484.4	3690.4	421.2	7054.3
Na	10	457.11	107.83	349.39	340.98	0.75	216.57	642.15	425.59	28.84	1107.52
Zr	10	78.30	13.83	66.31	43.74	0.56	41.35	95.49	54.14	39.91	156.12
P	10	589.53	112.13	464.95	354.57	0.60	329.96	848.55	518.58	134.09	1131.88
S	9	110.55	16.58	104.74	49.75	0.45	68.26	148.53	80.27	59.01	202.52
Ti	10	2901.5	565.8	2569.5	1789.3	0.62	1469.1	3811.5	2342.4	1035.1	6588.8
Y	10	19.73	4.10	12.62	12.97	0.66	10.77	28.52	17.75	5.54	41.49
Nb	10	5.70	1.22	4.06	3.86	0.68	2.75	7.41	4.66	2.14	12.65
La	10	19.67	5.19	12.39	16.42	0.84	11.66	28.30	16.64	3.80	56.92
Ce	10	47.30	10.05	39.96	31.78	0.67	25.41	55.22	29.81	12.30	112.41
Pr	10	4.51	1.02	3.38	3.22	0.71	2.49	5.76	3.27	1.21	10.34
Nd	10	18.24	3.99	13.09	12.61	0.69	9.66	23.86	14.20	5.06	40.26
Sm	10	4.23	0.83	3.08	2.62	0.62	2.41	6.65	4.24	1.32	8.21
Eu	10	1.02	0.19	0.82	0.59	0.58	0.54	1.53	0.99	0.33	1.85
Gd	10	3.66	0.70	2.89	2.21	0.60	2.01	4.79	2.78	1.27	7.52
Tb	10	0.54	0.09	0.45	0.30	0.55	0.33	0.72	0.39	0.19	1.03
Dy	10	3.13	0.51	2.72	1.60	0.51	2.08	4.15	2.07	1.15	5.74
Ho	10	0.62	0.10	0.50	0.30	0.48	0.45	0.86	0.41	0.23	1.10
Er	10	1.85	0.27	1.48	0.84	0.46	1.41	2.59	1.18	0.72	3.19
Tm	10	0.27	0.04	0.23	0.11	0.42	0.21	0.34	0.13	0.12	0.45
<sup>174</sup> Yb	10	1.79	0.23	1.58	0.72	0.40	1.39	2.09	0.70	0.84	3.01
Lu	10	0.27	0.03	0.24	0.11	0.40	0.21	0.30	0.09	0.13	0.48
Ta	10	0.50	0.12	0.36	0.37	0.74	0.23	0.60	0.37	0.17	1.16
Tl	10	0.31	0.05	0.29	0.16	0.53	0.19	0.39	0.20	0.07	0.60
Pb	10	17.79	5.87	10.01	18.56	1.04	7.77	17.35	9.58	3.19	62.01
Th	10	5.90	1.26	5.08	3.98	0.67	2.44	7.65	5.21	2.14	12.84
U	10	2.95	0.45	3.41	1.41	0.48	1.65	3.66	2.01	1.01	5.00

Já o intervalo interquartil (IQR) avalia o grau de espalhamento de dados (dispersão) em torno da medida de centralidade - mediana. Enquanto o desvio padrão calcula a medida de dispersão sem levar em conta a ordem dos dados, o intervalo interquartil avalia a dispersão de dados somente depois de ordená-los em ordem crescente. Resumidamente, o IQR determina a distância entre o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3), estando 50% dos dados dentro deste intervalo, ou seja, a metade dos dados está entre Q1 e Q2.

Os dados geoquímicos das amostras de solo “borra de café” foram submetidos também a uma análise de correlação linear obtendo como produto coeficientes de correlação de Pearson, também

chamados de "coeficientes de correlação produto-momento" ou simplesmente de " $\rho$  de Pearson". Comum na estatística descritiva, esse coeficiente mede o grau da correlação e a direção dessa correlação (se positiva ou negativa) entre os elementos químicos analisados.

Quanto maior for o valor absoluto do coeficiente, mais forte é a correlação entre as variáveis. Para a correlação de Pearson, um valor absoluto de 1 indica uma relação linear perfeita. A correlação perto de 0 indica que não há relação linear entre as variáveis. O sinal de cada coeficiente indica a direção da relação. Coeficientes com  $\rho \leq -0,9$  e  $\rho \geq +0,9$  foram considerados significativos para o presente trabalho, indicando correlação perfeita entre os elementos químicos analisados. Já coeficientes com  $\rho > -0,9$  e  $\rho < +0,9$  foram considerados como não significativos, indicando ausência ou correlação não expressiva entre os elementos. Os resultados da análise de correlação são apresentados na Tabela 6.2, com valores correlatos importantes destacados em cinza.

Considerando os elementos químicos analisados dentro do intervalo considerado significativo ( $\rho \leq -0,9$  e  $\rho \geq +0,9$ ), encontraram-se apenas correlações positivas - um total de cento e uma correlações positivas perfeitas.

A seguir serão discutidos as disposições das concentrações dos elementos maiores, dos elementos traço e dos elementos terras raras nas 10 amostras definidas como sendo de solos "borra de café" classificadas no capítulo anterior.

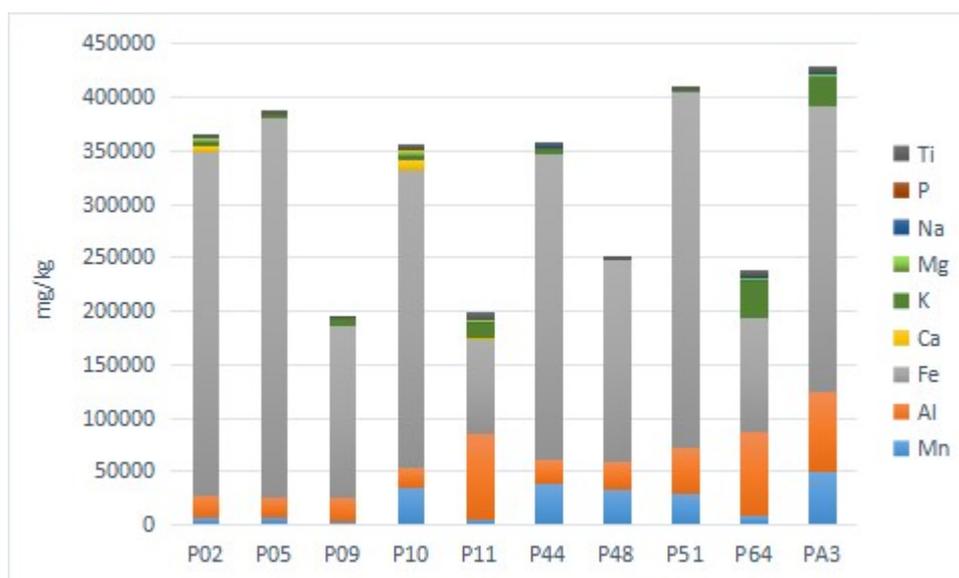


## 6.2.2 Elementos Maiores, Menores e Traço

Elementos maiores são definidos como os elementos que compõem em maioria a crosta terrestre. Na geoquímica, são elementos de concentração maiores que 1%, expressos geralmente em uma proporção percentual em massa do elemento com relação à massa da amostra (wt %). Já os elementos menores são os elementos químicos menos comuns em percentual de concentração na natureza em relação aos elementos maiores, com concentrações geoquímicas variando entre 0.1% e 1%, também expressas geralmente em peso do respectivo óxido (wt %) (Nogueira 2018). No presente estudo, tais elementos encontram-se na unidade mg/kg, ou seja, ppm (partes por milhão).

Os elementos traço são elementos químicos que em baixas concentrações no ambiente podem vir a constituir uma fonte potencial para a poluição ambiental devido a sua alta toxicidade. Em relação à geoquímica, são elementos de concentração menores que 0.1% (wt %), ou seja, inferiores a 1.000 ppm (Nogueira 2018). Neste trabalho, os elementos traço tais como Zr, Th, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Sc, Y, Sr, Ba, Nb, Pb, Th, Co e Li também apresentam suas concentrações em mg/kg. Destaca-se que os Terras Raras constituem um grupo específico dentro dos elementos traço e serão discutidos em um tópico à parte devido sua importância geoquímica para o material pedológico em questão.

A Tabela 6.3 elucidada a correspondência entre os elementos maiores, menores e traço existentes no presente estudo com os pontos amostrados e classificados como solos “borra de café”. A partir dessa tabela, concluiu-se que os elementos maiores e menores de grande importância para a compreensão dos solos “borra de café” foram Fe, Al, Mn, K, Ca, Mg, Na, P e Ti, em virtude de suas elevadas concentrações. A distribuição das concentrações ponto a ponto nas regiões com solo de interesse podem ser observadas na Figura 6.1.



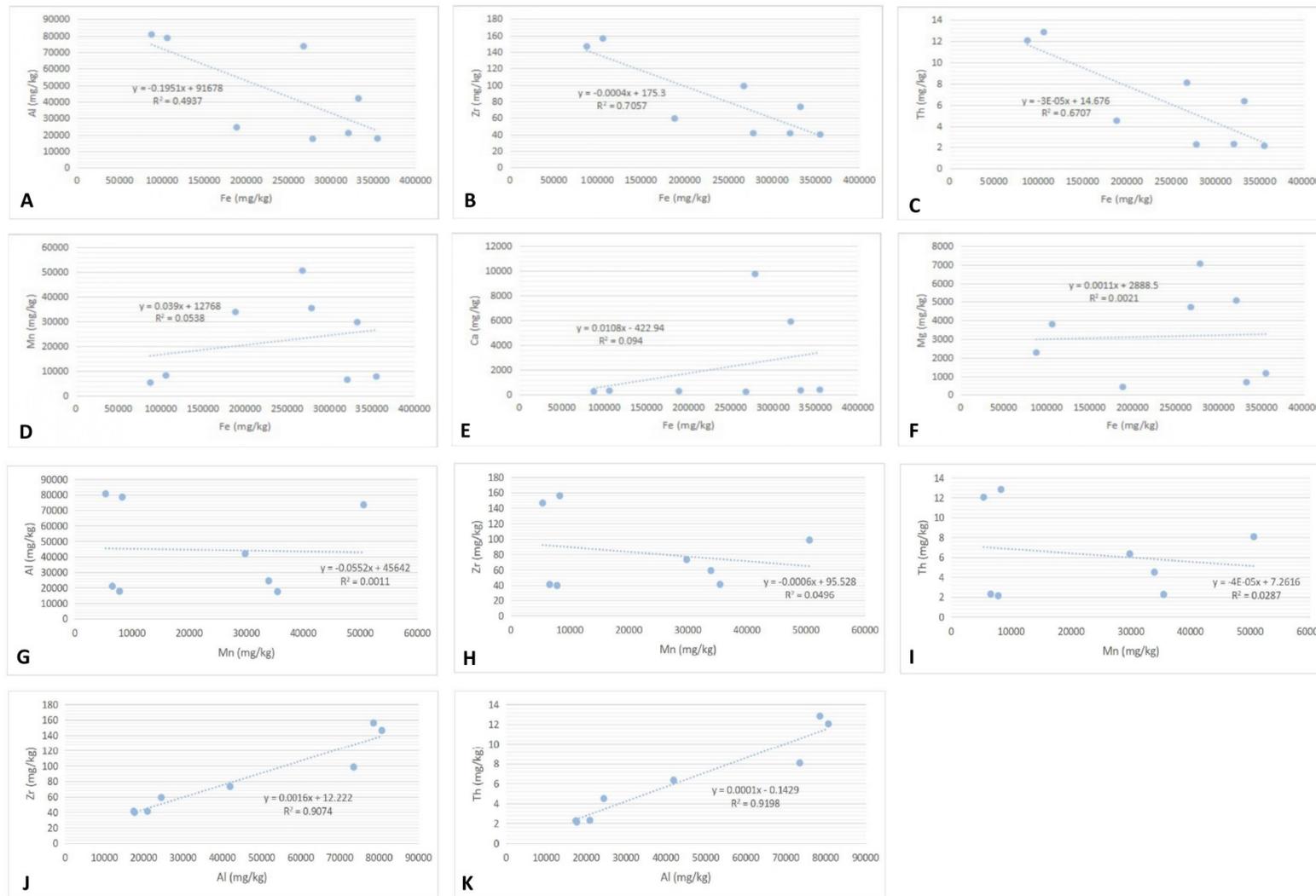
**Figura 6.1** - Ilustração da distribuição das concentrações de elementos maiores e menores ao longo das amostras nos pontos de interesse levantados como sendo de solo “borra de café” no capítulo anterior. As concentrações estão em mg/kg (ppm).

**Tabela 6.3** - Concentração de elementos maiores, menores e traço (em mg/kg) correlacionados com pontos amostrados detentores de solos carbonatados do tipo “borra de café”. Não constam os valores de Bi, Cd, Mo e Sb por não possuírem dados amostrais acima do limite de detecção.

Elementos (mg/kg)	Pontos amostrais										
	P02	P05	P09	P10	P11	P44	P48	P51	P64	PA3	LQ*
Mn	6569	7828	3266	35444	5380	38827	33901	29779	8285	50601	17.9
Al	20957	17685	22720	17461	80684	21381	24471	41952	78567	73545	150.0
Fe	320875	355300	159401	278607	87888	286105	188584	332685	106388	267851	39.4
Ca	5906	405	113	9747	265	1281	293	354	324	245	6.6
K	2190	1614	7075	2026	14581	3713	168	1017	34222	24973	23.3
Mg	5072	1155	598	7054	2271	1830	421	674	3792	4715	11.0
Na	366.8	196.7	495.6	276.2	691.0	332.0	28.8	187.3	889.1	1107.5	22.6
P	502.6	427.3	134.1	885.9	283.7	1131.9	317.7	366.9	736.6	1108.7	16.8
Ti	3134	1209	2058	1827	6589	1035	1350	3081	4695	4037	3.6
As	29.32	<LQ	<LQ	28.99	30.43	<LQ	<LQ	31.87	23.93	31.23	22.03
Ba	317.6	184.8	170.3	762.2	306.2	603.8	536.8	238.9	307.8	1604.5	2.6
Co	9.84	8.54	22.09	26.32	22.41	14.71	95.35	26.67	37.01	47.60	3
Cr	62.92	35.17	70.91	36.57	118.32	33.38	32.26	61.26	142.93	103.12	1.66
Cu	18.95	37.64	8.51	51.57	46.26	23.75	203.89	27.30	116.79	73.65	4.6
Li	11.50	10.09	6.06	17.34	25.03	11.70	396.41	4.76	24.23	153.23	0.707
Ni	30.14	<LQ	42.86	74.99	50.92	54.13	553.24	<LQ	220.01	96.25	12.64
Sr	20.73	2.36	12.75	91.61	14.22	56.37	2.43	2.91	60.44	103.40	0.846
V	39.92	40.83	87.04	53.35	149.67	36.73	46.68	86.62	113.04	118.10	1.6
Zn	61.92	34.98	14.03	96.76	27.15	75.68	595.03	44.27	335.10	211.86	0.801
Be	0.78	0.70	0.13	1.53	0.93	1.54	1.29	0.30	4.25	4.31	0.03
Zr	41.33	39.91	86.39	41.39	146.50	40.25	59.22	73.39	156.12	98.52	1.69
Th	2.31	2.14	5.64	2.27	12.06	2.81	4.51	6.35	12.84	8.08	0.0923
Al	20957	17685	22720	17461	80684	21381	24471	41952	78567	73545	150
S	156.86	114.24	68.26	104.74	74.68	66.08	59.01	148.53	<LQ	202.52	42.23
Ti	3134	1209	2058	1827	6589	1035	1350	3081	4695	4037	3.64
Sc	5.26	4.38	7.22	4.64	17.8	7.22	4.74	8.97	14.3	15.4	0.178
Nb	4.60	2.14	3.52	2.62	12.6	2.58	3.15	6.13	11.8	7.84	0.1105
Ta	0.314	0.169	0.398	0.209	1.12	0.19	0.281	0.477	1.16	0.640	0.004
Pb	8.17	3.19	4.26	7.64	10.46	9.56	17.67	38.53	16.37	62.01	1.52
Th	2.31	2.14	5.64	2.27	12.06	2.81	4.51	6.35	12.84	8.08	0.0923
U	1.06	1.01	1.35	2.57	3.26	3.61	3.68	3.55	4.45	5.00	0.006
Tl	0.144	0.0748	0.204	0.191	0.392	0.272	0.313	0.387	0.483	0.603	0.002

As correlações lineares ( $\rho$  de Pearson) para os elementos maiores, menores e traço podem ser observadas na Tabela 6.2 e a disposição na forma de gráficos entre os elementos de maior interesse para o estudo do solo “borra de café” é abordado a seguir na Figura 6.2. Em relação ao Fe, as correlações encontradas com os demais elementos são majoritariamente negativas. Dentre as mais importantes, tem-se as correlações com Al ( $\rho = -0.60$ ), Zr ( $\rho = -0,82$ ) e Th ( $\rho = -0,78$ ) (Figura 6.2 A a C) que caracterizam uma origem elementar não siliciclástica no material. As correlações do Mn com esses elementos (Al ( $\rho = -0.60$ ), Zr ( $\rho = -0,82$ ) e Th ( $\rho = -0,78$ )) permitem a mesma interpretação (Figura 6.2 G a I). Destacam-se também correlações positivas entre o Fe com os elementos Mn ( $\rho = 0.34$ ), Ca ( $\rho = 0.33$ ) e Mg ( $\rho = 0.11$ ) (Figura 6.2 D e F) oriundas da composição carbonática e itabirítica parental desse solo.

Para o Al, as correlações encontradas mais interessantes são com: Zr ( $\rho = 0.92$ ) e Th ( $\rho = 0.94$ ) (Figura 6.2 J e K), sugerindo uma origem terrígena para a presença desse elemento no solo “borra de café”, muito provavelmente advinda dos fragmentos de filitos prateados imersos nesses solos como resistatos. Discussões acerca da origem elementar serão melhores detalhas nos seguintes tópicos.



**Figura 6.2** - Gráficos com correlações lineares listadas entre os elementos maiores, menores e traço de maior interesse analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café”.

Sabe-se que os elementos cálcio, magnésio, potássio e sódio são facilmente encontrados em rochas carbonatadas. E que em um clima tropical, estas rochas são facilmente intemperizáveis, liberando esses elementos para o ambiente em forma de solução e partículas que vão compor os solos da região, em especial, o “borra de café”. Entretanto, esperava-se um percentual de participação do Ca, Mg, K e Na bem maiores que os observados (Tabela 6.3), ao menos superiores a participação do Fe e Mn, uma vez que os solos “borra de café” possuem correlação direta com material parental carbonatado, constituído por minerais carbonáticos tais como calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] e a aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ) (Nogueira 2018).

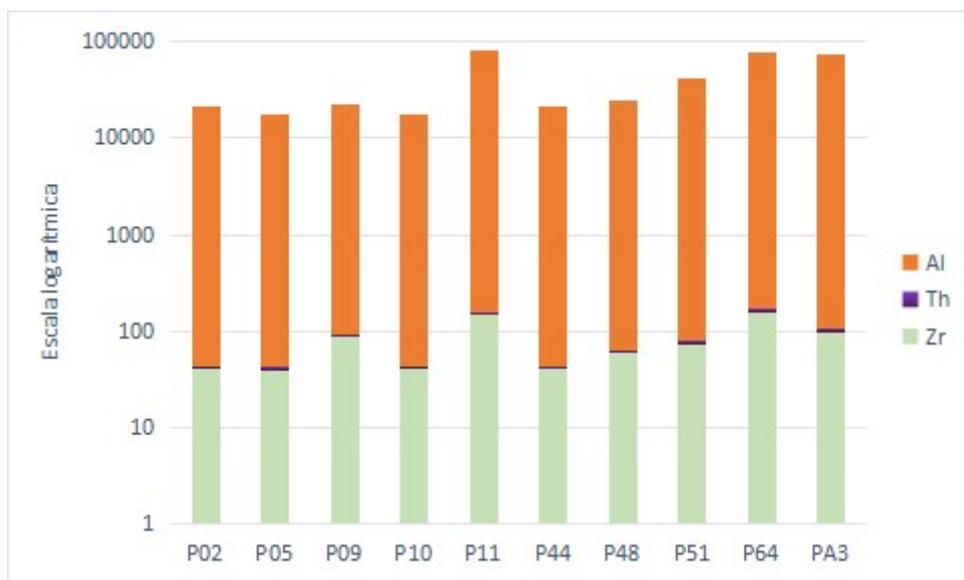
A Figura 6.1 expõe ainda o expressivo conteúdo de Fe e Mn nesses solos, advindos provavelmente de uma contaminação externa ao material parental. Isso ocorreu provavelmente mediante a proximidade das litologias e sedimentos carbonatados com produtos oriundos da Formação Cauê (Grupo Itabira). A Figura 1.3 ilustra a proximidade dos pontos amostrados a essas litologias itabiríticas, e, na Figura 2.1, observa-se a presença de drenagens nos locais de interesse, que provavelmente contribuíram para a mobilização e o transporte de materiais alóctones tais como sedimentos, fragmentos de rochas, minerais e elementos químicos em solução ou partículas que ao se depositarem (ou sofrerem precipitação) irão influenciar e compor o solo “borra de café”.

Diante do exposto, uma das formas de ocorrência para a contaminação do perfil de alteração por material externo, que teria formulado a composição típica sugerida para as amostras de solo “borra de café” seria uma contaminação por material detrítico continental com influência provável de meio aquoso. A fim de rastrear possíveis contaminações terrígenas em algum momento da gênese desse solo, observou-se o comportamento de elementos indicadores terrígenos (Zr, Th e Al).

Frimmel (2009), a fim de rastrear possíveis contaminações, definiu alguns parâmetros a partir dos quais é possível gerar mudanças significativas na anomalia dos elementos, dentre eles: (1) as concentrações de Zr devem ser maiores que 4 ppm; e (2) as concentrações de Al, Th e Si devem ser altas (nenhum limite estabelecido). Com base em alguns desses elementos, seguem abaixo tópicos com discussões geoquímicas para a elucidação da constituição e evolução do solo “borra de café”.

#### **6.2.2.1 Concentrações de Zr, Th e Al**

Segundo Frimmel (2009), as concentrações de Zr são utilizadas como boas monitoras de contaminação continental em rochas carbonáticas, pois rochas continentais são ricas neste elemento. Similarmente, as concentrações de Al e Th são usadas como bons monitores de contaminação por material continental (Frimmel 2009). Os resultados para concentração do Zr, Al e Th estão representados na Tabela 6.3, ao passo que a Figura 6.3 expõe visualmente a distribuição das concentrações desses elementos ao longo das amostras nos pontos de interesse tal qual como feito na Figura 6.1.



**Figura 6.3** - Ilustração da distribuição das concentrações de Zr, Th e Al ao longo das amostras nos pontos de interesse levantados como sendo de solo “borra de café”. O eixo das ordenadas encontra-se em escala logarítmica devido a grande amplitude de valores para as concentrações desses elementos.

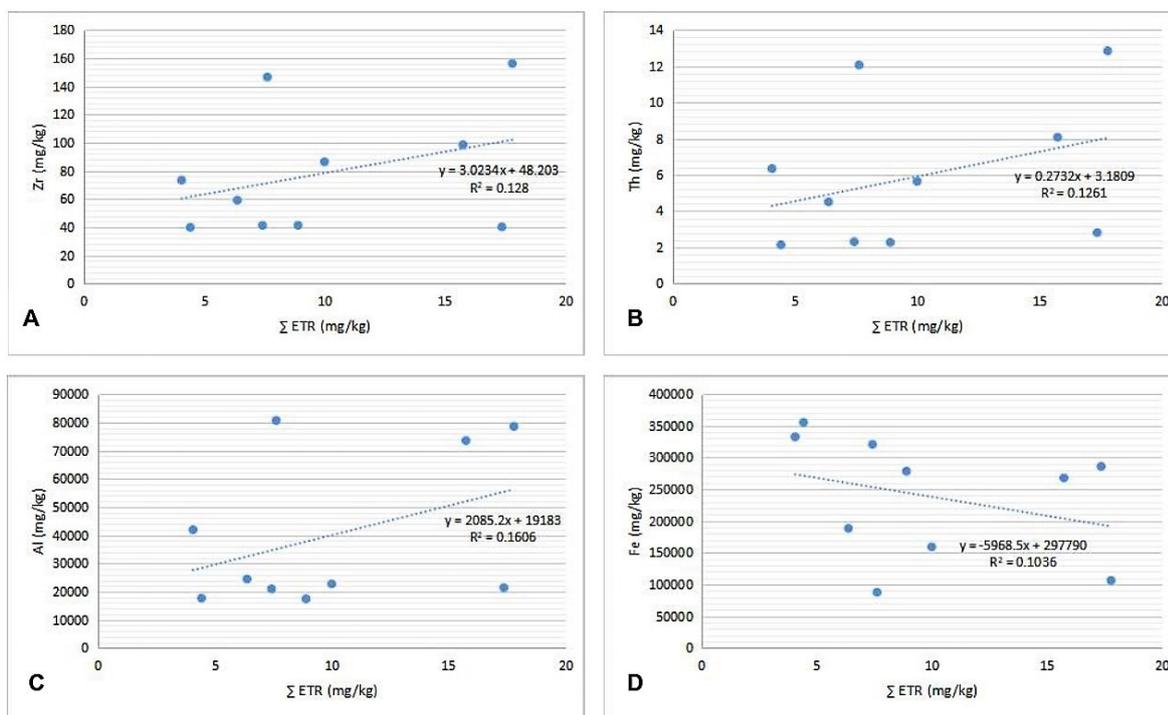
É possível identificar que as concentrações de Zr para todas as amostras estão acima do limite estabelecido (4 ppm), variando de 39.91 a 156.12 ppm (média de 82.05 ppm) o que indica a entrada de terrígenos no sistema. Já as concentrações de Th são as mais baixas, variando de 2.14 a 12.84 ppm (média de 6.32 ppm).

As concentrações de Al são as mais elevadas (ilustrada também na Figura 6.1), sendo inferiores às de Fe e maiores que as de Mn, variando de 17 460.71 a 80 684.16 ppm (média de 44 415.27 ppm). A distribuição das concentrações de Al no solo “borra de café” sugere um conteúdo enriquecido em argilominerais. Essa sugestão é válida, uma vez que a descrição e discussão feitas ao longo do Capítulo 5 a respeito do aspecto e da composição desse solo, caracteriza-o como sendo argiloso.

Uma explicação para a entrada de material continental por rios nas rochas e sedimentos carbonáticos pode ser representada pela relação das concentrações de Zr, Th e Al com o somatório dos teores de ETR. Segundo (Frimmel 2009), esses elementos em águas fluviais têm uma relação direta positiva com o aumento de ETR totais como ilustrado na Figura 6.4 (em A, B e C). Em relação ao  $\sum$  ETR, os coeficientes de correlação linear encontrados são: Zr ( $\rho = 0,62$ ), Th ( $\rho = 0,60$ ) e Al ( $\rho = 0,66$ ).

Destaca-se que o elemento Fe, representado na Figura 6.4 (em D), possui uma correlação linear negativa quando comparado ao  $\sum$  ETR (com  $\rho = -0,48$ ), o que sugere que sua origem não está correlacionada com uma contaminação por material detrítico, ou seja, o ferro não foi incorporado na forma de sedimentos siliciclásticos durante a geração do material parental, e sim, através de uma contribuição aquosa responsável pela remoção de Fe de oxi-hidróxidos de ferro do meio e sua

precipitação na forma de nódulos/concreções ferro-magnesianas em materiais como o solo “borra de café”. Discussões como essa acerca da origem do Fe serão feitas mais adiante ainda neste Capítulo.



**Figura 6.4** - Gráficos com correlações lineares positivas entre o  $\Sigma$  ETR e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” (respectivamente A, B e C), com intuito de compreender a influência de uma contaminação detrítica nesse solo. Em D, observa-se essa mesma correlação, porém negativa e com o Fe para esse mesmo material.

A entrada de materiais ricos nesses elementos aumenta a concentração de alguns ETR, além de promover a presença de algumas anomalias positivas de ETR tais como a de Ce e de Eu. Essas anomalias em ETR serão melhor abordadas no item 6.2.3 - Elementos Terras Raras.

### 6.2.3 Elementos Terras Raras

São denominadas Terras Raras o conjunto de 15 elementos químicos constituídos pela família dos lantanídeos mais o ítrio. Eles são encontrados naturalmente como constituintes das rochas e fazem parte da constituição química de vários minerais. As grandes variações dos teores totais de Terras Raras nos solos são altamente dependentes do tipo de solo e principalmente do material de origem a partir do qual eles são emitidos (Laveuf *et al* 2009). Sua liberação diferencial na solução do solo é governada pelo intemperismo de silicatos comuns (como hornblenda, epidoto, feldspato e mica), de fosfatos (como apatita) ou de minerais raros enriquecidos (como alanita e monazita) (Öhlander *et al.* 1996).

Os maiores acúmulos de Elementos Terras Raras (ETR) em solos ocorrem através do intemperismo que permite o fracionamento dos ETR oriundos do material de origem, de acordo com os seguintes fatores: (i) a natureza e abundância relativa dos minerais primários; (ii) condições meteorológicas (intensidade, pH, complexos na solução do solo...) e (iii) a natureza e abundância relativa dos minerais secundários formado (Aubert *et al.* 2002). Outras fontes de ETR em solos advém de deposições atmosféricas (partículas atmosféricas, água da chuva e neve) e espalhamentos antropogênicos (amostras de resíduos, irrigação, águas de esgoto, e especialmente fertilizantes) (Aubert *et al.* 2002).

Os ETR são considerados importantes para estudos geoquímicos, pois além de serem utilizados para identificar o ambiente deposicional, podem ser utilizados também para identificar as condições paleo-redox e diagênese (Nogueira 2018, Nogueira *et al.* 2019) uma vez que apresentam pouca mobilidade durante processos pós-deposicionais (McLennan & Taylor 1991). No caso das rochas sedimentares, vide exemplos Capítulo 4 (Grupo Itabira), elas podem manter a assinatura da água do mar preservada, sugerindo que a maioria dos ETR presentes em sua constituição foram derivados da água do mar no momento da deposição sedimentar.

Os Elementos de Terras Raras (ETR) são comumente divididos em ETR leves (ETRL: La ao Nd), em ETR médios (ETRM: Sm ao Gd) e em ETR pesados (ETRP: Y ao Lu) com base em seus pesos e raios atômicos. Ademais, exibem concentrações muito contrastantes, apresentando duas características distintas: (1) geralmente tendem a diminuir de La a Lu; e (2) os ETR com números atômicos pares tendem a ter concentrações mais altas do que os com número atômico ímpares (Alfaro *et al.* 2018). A fim de eliminar esses dois efeitos e mostrar visualmente os padrões de distribuição dos ETR, a normalização para uma referência é comumente aplicada às suas concentrações.

O *Post Archean Australian Shale* (PAAS) (McLennan 1989) foi escolhido neste estudo como material de referência para normalizar as concentrações de Terras Raras presentes nas amostras de solos “borra de café” e, posteriormente, obter um perfil de distribuição destes em cada sítio amostral. As concentrações dos ETR, em mg/kg, e os valores normalizados estão apresentados na Tabela 6.4 e Tabela 6.5, respectivamente.

**Tabela 6.4** - Concentração de elementos terras raras (mg/kg) não normalizados encontrados nos pontos amostrados detentores de solos carbonatados do tipo “borra de café”.

Elementos (mg/kg)	Pontos amostrais										
	P02	P05	P09	P10	P11	P44	P48	P51	P64	PA3	LQ*
<b>La</b>	12.3	3.8	11.6	12.4	18.4	31.6	12.0	4.48	56.9	33.2	0.2035
<b>Ce</b>	24.0	12.3	26.1	25.2	43.3	38.1	41.9	59.2	90.6	112	0.3968
<b>Pr</b>	3.44	1.21	4.23	3.05	3.32	10.34	2.30	1.33	9.58	6.27	0.0513
<b>Nd</b>	13.80	5.15	23.96	12.37	12.17	40.26	8.82	5.06	37.23	23.56	0.0019
<b>Sm</b>	3.42	1.32	6.78	2.73	2.68	8.21	2.31	1.34	7.27	6.28	0.02458
<b>Eu</b>	0.849	0.366	1.560	0.789	0.669	1.85	0.497	0.332	1.83	1.43	0.00335
<b>Gd</b>	2.71	1.35	4.84	3.07	2.62	6.80	1.81	1.27	7.52	4.64	0.0173
<b>Tb</b>	0.426	0.235	0.616	0.481	0.40	1.03	0.301	0.187	1.00	0.750	0.0022
<b>Dy</b>	2.50	1.55	2.93	3.06	2.43	5.74	1.96	1.15	5.49	4.51	0.0098
<b>Ho</b>	0.486	0.344	0.515	0.666	0.488	1.10	0.432	0.229	1.05	0.930	0.00345
<b>Y</b>	12.3	10.2	12.7	25.9	12.5	29.4	8.86	5.54	41.5	38.3	0.0793
<b>Er</b>	1.43	1.08	1.48	2.04	1.47	3.19	1.41	0.716	2.78	2.92	0.0073
<b>Tm</b>	0.205	0.169	0.214	0.288	0.224	0.452	0.227	0.118	0.351	0.448	0.0018
<sup>174</sup> <b>Yb</b>	1.38	1.16	1.42	1.84	1.58	2.95	1.58	0.837	2.17	3.01	0.0039
<b>Lu</b>	0.205	0.187	0.216	0.290	0.239	0.433	0.238	0.130	0.297	0.479	0.0012
<b>∑ETR</b>	79.54	40.46	99.16	94.14	102.58	181.41	84.56	81.89	265.56	239.07	-

LQ = Limite de Quantificação

**Tabela 6.5** - Concentração de elementos terras raras (mg/kg) nos pontos amostrados detentores de solos carbonatados do tipo “borra de café”. Valores de ETR + Y encontram-se normalizados pelo PAAS (*Post Archean Australian Shale*). Além de resultados das anomalias de Ce/Ce\*, Pr/Pr\*, Eu/Eu\*, La/La\* e das razões de (La/Yb)<sub>N</sub>, Y/Ho, (Nd/Yb)<sub>N</sub> e (Pr/Yb)<sub>N</sub>.

Elementos (mg/kg)	Pontos amostrais											
	P02	P05	P09	P10	P11	P44	P48	P51	P64	PA3	LQ*	PAAS**
La	0.323	0.100	0.303	0.325	0.482	0.827	0.313	0.117	1.490	0.868	0.2035	38.2
Ce	0.301	0.155	0.328	0.316	0.544	0.478	0.526	0.743	1.138	1.412	0.3968	79.6
Pr	0.390	0.137	0.479	0.346	0.376	1.171	0.260	0.150	1.085	0.710	0.0513	8.83
Nd	0.407	0.152	0.707	0.365	0.359	1.188	0.260	0.149	1.098	0.695	0.0019	33.9
Sm	0.617	0.238	1.222	0.491	0.483	1.479	0.417	0.241	1.310	1.131	0.02458	5.55
Eu	0.786	0.339	1.445	0.731	0.620	1.709	0.460	0.307	1.696	1.324	0.00335	1.08
Gd	0.581	0.290	1.038	0.658	0.563	1.460	0.388	0.273	1.613	0.995	0.0173	4.66
Tb	0.550	0.304	0.797	0.621	0.522	1.327	0.388	0.242	1.289	0.969	0.0022	0.774
Dy	0.535	0.330	0.626	0.653	0.519	1.226	0.418	0.246	1.174	0.965	0.0098	4.68
Ho	0.491	0.347	0.520	0.672	0.493	1.113	0.436	0.231	1.055	0.939	0.00345	0.991
Y	0.457	0.379	0.471	0.958	0.464	1.089	0.328	0.205	1.537	1.418	0.0793	27
Er	0.501	0.378	0.520	0.715	0.516	1.120	0.493	0.251	0.975	1.025	0.0073	2.85
Tm	0.507	0.416	0.527	0.710	0.553	1.117	0.561	0.290	0.867	1.107	0.0018	0.405
Yb	0.488	0.412	0.503	0.654	0.561	1.046	0.559	0.297	0.769	1.068	0.0039	2.82
Lu	0.472	0.432	0.498	0.669	0.553	1.001	0.551	0.301	0.686	1.107	0.0012	0.433
Σ ETR	7.407	4.409	9.983	8.884	7.608	17.350	6.360	4.045	17.781	15.732	-	-
Ce/Ce*	0.81	1.27	1.30	0.97	1.38	0.41	2.02	4.90	1.06	1.95	-	-
Pr/Pr*	1.10	0.89	0.93	1.02	0.83	1.41	0.66	0.34	0.97	0.67	-	-
Eu/Eu*	1.34	1.32	1.35	1.38	1.26	1.21	1.14	1.29	1.31	1.24	-	-
La/La*	0.91	0.94	12.39	1.06	1.17	0.73	1.20	0.77	1.41	1.17	-	-
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.66	0.24	0.60	0.50	0.86	0.79	0.56	0.39	1.94	0.81	-	-
(Nd/Yb) <sub>N</sub>	0.83	0.37	1.40	0.56	0.64	1.14	0.47	0.50	1.43	0.65	-	-
(Pr/Yb) <sub>N</sub>	0.80	0.33	0.95	0.53	0.67	1.12	0.47	0.51	1.41	0.67	-	-
Y/Ho	25.39	29.79	24.67	38.88	25.67	26.66	20.52	24.17	39.70	41.14	-	-
(Sm/Yb) <sub>N</sub>	1.26	0.58	2.43	0.75	0.86	1.41	0.75	0.81	1.71	1.06	-	-
(Eu/Sm) <sub>N</sub>	1.27	1.42	1.18	1.49	1.28	1.16	1.10	1.28	1.29	1.17	-	-

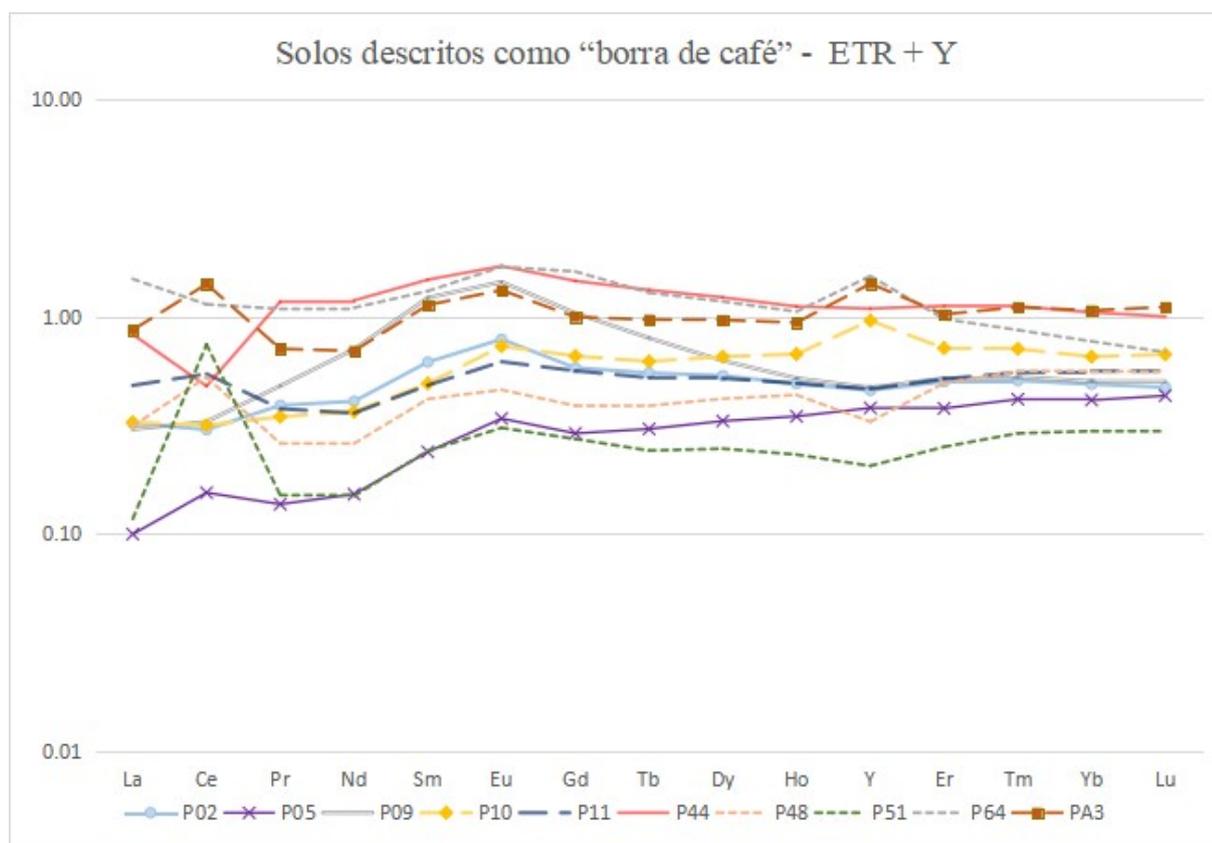
LQ = Limite de Quantificação

PAAS = Post Archean Australian Shale

A representação da distribuição das concentrações dos ETR + Y, normalizadas pelo PAAS, em função de pontos amostrados representados na forma de um gráfico permite a observação de anomalias no padrão comportamental dos ETR que são estudadas a partir do deslocamento da curva de um elemento em relação à curva de seus vizinhos. Valores com resultados >1 representam anomalias positivas e <1, anomalias negativas (Henderson 1984). As apresentações numéricas dessas anomalias podem ser vistas no final da Tabela 6.5.

Neste trabalho, as anomalias de Ce (Ce/Ce\*) foram calculadas a partir da equação  $Ce/Ce^* = (Ce/2Pr-1Nd)_{sn}$  (Bolhar *et al.* 2004) e as de Pr (Pr/Pr\*), pela razão  $Pr/Pr^* = (Pr/0,5Ce + 0,5 Nd)_{sn}$  (Bau & Dulski 1966). Destaca-se que a obtenção de uma anomalia negativa de Ce sempre resultará em  $(Pr/Pr^*)_{sn} > 1$ , enquanto que uma anomalia positiva de Ce, acarretará em  $(Pr/Pr^*)_{sn} < 1$  (Nogueira 2018). Já as anomalias de Eu (Eu/Eu\*) e de La (La/La\*) foram obtidas, respectivamente, pelas equações:  $Eu/Eu^* = (Eu/0.66 Sm + 0.33 Tb)_{sn}$  (Planavsky *et al.* 2010) e  $La/La^* = (La/3Pr-2Nd)_{sn}$  (Frimmel 2009).

A distribuição das concentrações dos ETR + Y, normalizadas pelo PAAS, em função dos pontos levantados classificados como sendo de solos “borra de café” é retratada na Figura 6.5. Os padrões comportamentais dos ETR são quase planos, com leve enriquecimento em ETR pesados quando comparado com os ETR leves. Há ligeiras anomalias positivas de Eu encontradas em todas as amostras (Tabela 6.5). Entretanto, quando outros elementos como Ce, Y e Pr são observados, conclui-se que as anomalias encontradas não apresentam um padrão majoritariamente positivo ou negativo. Conseqüentemente, o solo “borra de café” não se encontraria bem retratado quimicamente, sendo necessário uma nova organização das amostras para obtenção de melhores resultados.

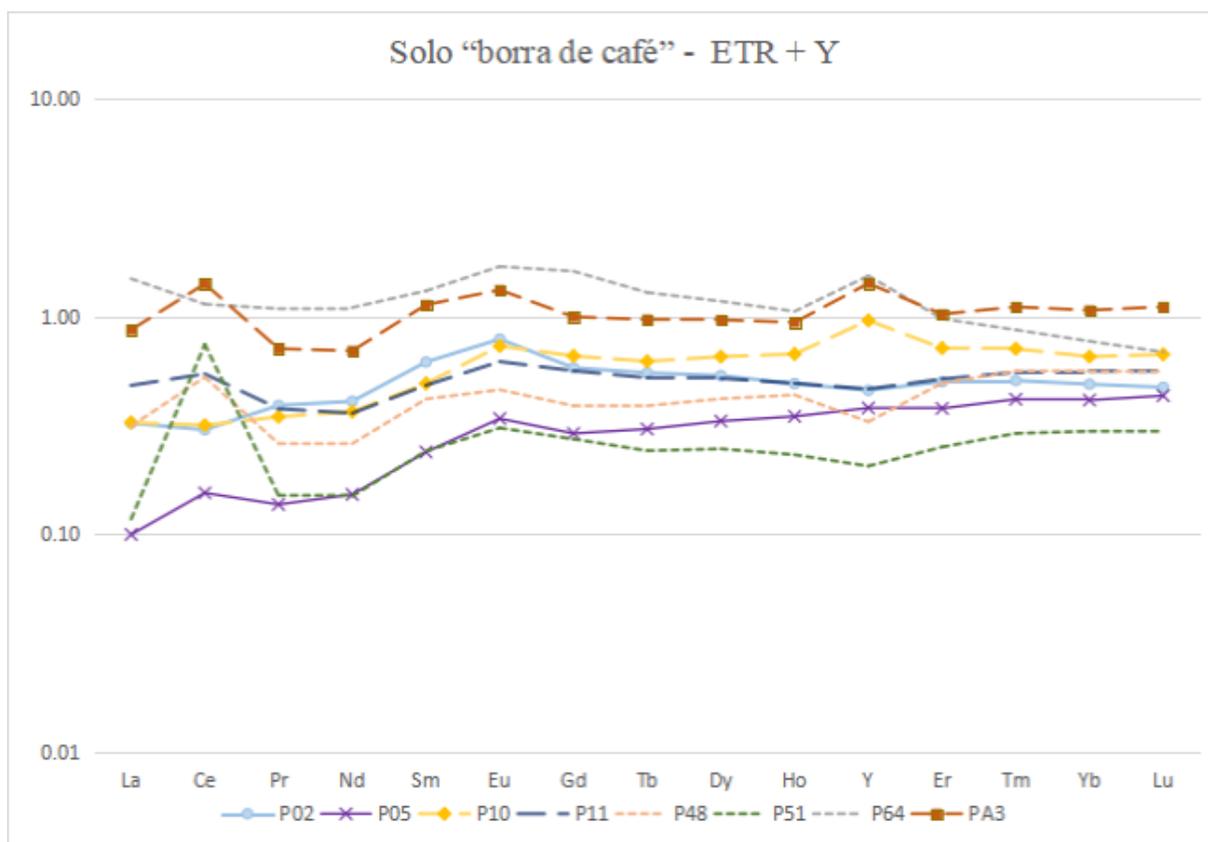


**Figura 6.5** - Diagrama de ETR + Y com dados normalizados pela composição do *Post-Archean Australian Shale* (PAAS) para as 10 amostras descritas macroscopicamente como sendo de solos “borra de café”. O gráfico mostra anomalias de Ce e Y (positivas e negativas), e anomalias positivas de Eu. Além de um leve enriquecimento em ETR pesados.

Diante do exposto, optou-se pela desconsideração das amostras pertencentes aos Pontos 9 e 44, uma vez que seus padrões comportamentais de ETR + Y são diferentes do que acredita-se melhor caracterizar um solo “borra de café”. O Ponto 9 possui um enriquecimento expressivo de Eu, além de não apresentar também outras anomalias como de Ce e de Y como as outras amostras. Já o Ponto 44 caracteriza uma amostra com a mais expressiva anomalia negativa de Ce dentre os demais materiais estudados, além de constituir a única amostra com anomalia positiva de Pr bem elevada. Contudo, cabe dizer que a omissão dessas amostras do perfil ETR+Y não significaria dizer que elas não sejam

necessariamente representantes do solo “borra de café”, uma vez que seus padrões físicos são condizentes desse solo (Capítulo 5). Provavelmente elas sofreram influência de algum outro fator externo que resultou em sua formulação, talvez processos de contaminação em momentos distintos ou variação da influência do meio aquoso na região. Tal situação pode vir a ser estudada em trabalhos futuros, com a revisitação desses pontos em campo.

O gráfico final com o diagrama dos ETR + Y normalizados que elucidam o comportamento dos solos “borra de café” após as mudanças propostas pode ser observado na Figura 6.6.



**Figura 6.6** - Diagrama de ETR + Y com dados normalizados pela composição do *Post-Archean Australian Shale* (PAAS) ilustrando o comportamento de solos classificados como “borra de café” ao longo das 8 amostras que mais o representaram. Observa-se um padrão plano com um leve enriquecimento em ETR pesados, além de anomalias positivas de Ce, Eu e Y.

O espectro de ETR para o solo “borra de café” estudado possui comportamentos geoquímicos comuns com os levantados no Capítulo 4, mais especificamente os que refletem as litologias do Grupo Itabira (Formações Gandarela e Cauê) (Figura 4.2). Observa-se que o material pedológico caracterizado possui um padrão comportamental que ilustra um enriquecimento dos ETR pesados em relação aos ETR leves, mesmo que mais suave (padrão quase plano) do que o observado nas rochas carbonáticas e itabiríticas. Apresenta também anomalias positivas de Eu e de Y bem expressivas. Entretanto, no que diz respeito às anomalias de Ce, nos solos “borra de café” elas se mostram expressivamente mais positivas, diferentes das negativas encontradas nos carbonatos da Formação

Gandarela e correspondente com alguns comportamentos de itabiritos. Ademais, esse solo também possui as razões de  $(\text{Eu}/\text{Sm})_N > 1$  em todas as amostras. O conteúdo de  $\Sigma\text{ETR}$  (Tabela 6.5) mostra uma variação significativa (40.46 a 265.56 ppm (mg/kg)) em nosso conjunto de amostras.

As razões de  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ,  $(\text{Nd}/\text{Yb})_N$  e  $(\text{Pr}/\text{Yb})_N$  são conhecidas por quantificarem a inclinação do padrão de curvas normalizadas de  $\text{ETR} + \text{Y}$ . Quando positivas, caracterizam um solo rico em ETR leves e pobre em ETR pesados (Nogueira 2018). As razões encontradas para o solo “borra de café” (Tabela 6.5) foram majoritariamente negativas, com valores médios de  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  0.75<sub>PAAS</sub>,  $(\text{Nd}/\text{Yb})_N$  0.68<sub>PAAS</sub> e  $(\text{Pr}/\text{Yb})_N$  de 0.67<sub>PAAS</sub>, justificando o padrão observado de pequena depleção em ETR leves em comparação aos pesados. Apenas a amostra do Ponto 64 destoa de tal comportamento, apresentando ligeiro empobrecimento em ETR pesado. Decidiu-se por não descartá-la, uma vez que ela apresentava o padrão de anomalias ETR (Ce, Eu e Y) condizentes com os das outras amostras validadas como sendo do solo de interesse.

Seguem abaixo tópicos com discussões geoquímicas acerca das anomalias encontradas no diagrama de  $\text{ETR} + \text{Y}$  representativo do solo “borra de café” (Tabela 6.5 e Figura 6.6).

#### 6.2.3.1 Comportamento do Y e razão Y/Ho

A abundância relativa de Y pode ser assumida usando a razão Y/Ho (não normalizada pelo PAAS). A razão Y/Ho em águas fluviais é próxima de 26.4, assim como a encontrada na crosta continental; enquanto que na água do mar a razão varia de 60 a 90 (Lawrence *et al.* 2006). Em carbonatos sedimentares de origem marinha, as razões variam de 45 a 60, sendo suficientes para acarretar valores positivos de Y/Ho (Lawrence *et al.* 2006).

No presente estudo, as razões Y/Ho variaram de 20.52 a 41.14 ppm (média de 30.66) para as amostras do solo de interesse. Os valores mais elevados obtidos ( $>30$ ) são suficientes para gerar anomalias positivas de Y (Y/Ho) leves no diagrama de  $\text{ETR} + \text{Y}$  (Pontos A3, 64 e 10). Contudo, não chegam a permitir que as amostras analisadas atinjam a elevada razão Y/Ho característica da assinatura da água do mar oriunda do material parental.

Os valores mais baixos ( $<30$ ) dessa razão observados sugerem uma contaminação por materiais terrígenos dessas amostras provavelmente advinda de misturas de águas oceânicas com fluviais (Nogueira 2018, Lawrence *et al.* 2006). As amostras dos Pontos 48 e 51 caracterizam essas menores razões Y/Ho, apresentando-se no diagrama de  $\text{ETR} + \text{Y}$  através de anomalias leves negativas de Y.

Valores fortemente positivos para as razões Y/Ho, característicos de águas marinhas, não foram observados em nenhuma das amostras do projeto. As razões Y/Ho dos solos de interesse resultaram em valores distintos do esperado para um carbonato típico marinho, contudo são condizentes com o de um produto pedológico carbonatado. Assim, para essas amostras, pode-se inferir

que houve em algum momento uma contaminação provavelmente por material terrígeno transportado por águas provenientes do continente.

### 6.2.3.2 Anomalia positiva de Ce

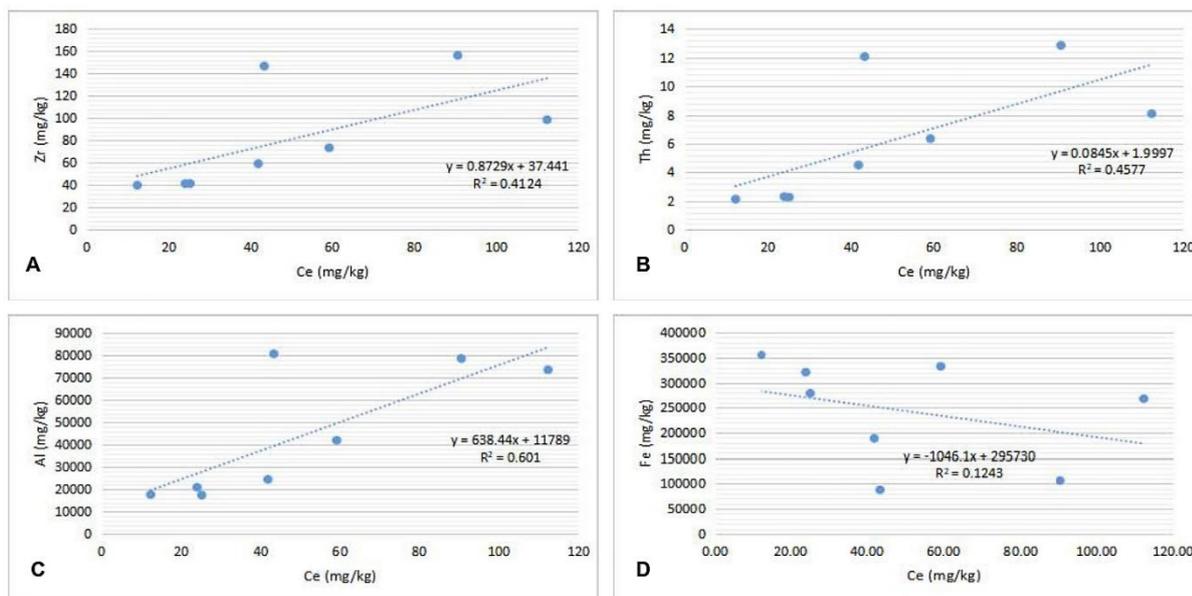
Observações das anomalias de cério em rochas carbonáticas marinhas são importantes, pois permitem o rastreamento da entrada de sedimentos terrígenos e mapeamento da condição de oxidação-redução no momento e local da deposição (Nagarajan *et al.* 2011). Tais observações podem ser estendidas também para os produtos pedológicos oriundos dessas rochas.

As amostras de solo “borra de café” coletados ao longo do Sinclinal Dom Bosco apresentam consideráveis variações em Ce/Ce\* (0,81 a 4,90), com média Ce/Ce\* = 1,79 (Tabela 6.5). Em relação às anomalias de Ce, os resultados indicam valores levemente positivos (1,06 a 1,38) para as amostras dos Pontos 5, 11 e 64; e valores de anomalias positivas (>1,38) para as amostras dos Pontos A3, 48 e 51. As amostras dos Pontos 02 e 10 apresentam os menores valores para essa anomalia (respectivamente, 0,81 e 0,97), mas pouco interferem na ilustração do padrão de distribuição dos ETR + Y para o solo “borra de café” (Figura 6.6).

A anomalia de Ce pode ser compreendida em termos da oxidação do Ce trivalente para um estado menos solúvel, Ce tetravalente, e subsequente remoção do meio aquoso por precipitação como CeO<sub>2</sub> ou por absorção em Fe/Mn-(hidr)óxidos (Sholkovitz *et al.* 1994; Laveuf *et al.* 2008). Portanto, anomalias de Ce em materiais carbonáticos revelam a inclusão de ETR diretamente da água do mar, apresentando anomalias negativas sob condições oxidativas, e anomalias positivas sob condições redutoras (Frimmel 2009).

Ademais, a origem do Ce nas amostras analisadas pode estar relacionada também à presença de materiais terrígenos, devido às correlações positivas do Ce com Zr, Th e Al (coeficiente de correlação  $\rho = 0,61$ ,  $\rho = 0,67$ ,  $\rho = 0,79$ , respectivamente) ilustradas na Figura 6.7 em A, B e C. Esses materiais terrígenos possivelmente teriam uma origem advinda de uma contribuição fluvial, que resultou na remoção de Fe de hidróxido de ferro do meio (Frimmel 2010). Para monitorar esta influência, utilizou-se as concentrações de Ce versus Fe como indicadores da influência de águas na região, que seriam responsáveis pelo transporte de colóides ricos de Fe. O resultado obtido é o de uma correlação negativa entre as concentrações de Ce versus Fe (Figura 6.7 - D), representando a depleção do ferro nas amostras de solos “borra de café” pela água em algum momento de sua evolução pedogênica.

A correlação linear negativa entre o Ce e concentrações de Fe está intimamente relacionada com a existência de nódulos de ferro-manganesíferos presentes nos solos “borra de café” (descritos no Capítulo 5 do presente trabalho). Isso é possível uma vez que nesses nódulos há a absorção de Ce<sup>+4</sup> preferencialmente por parte dos óxidos de ferro e manganês, causando o enriquecimento de Ce em relação aos elementos vizinhos (anomalias positivas de Ce observadas).



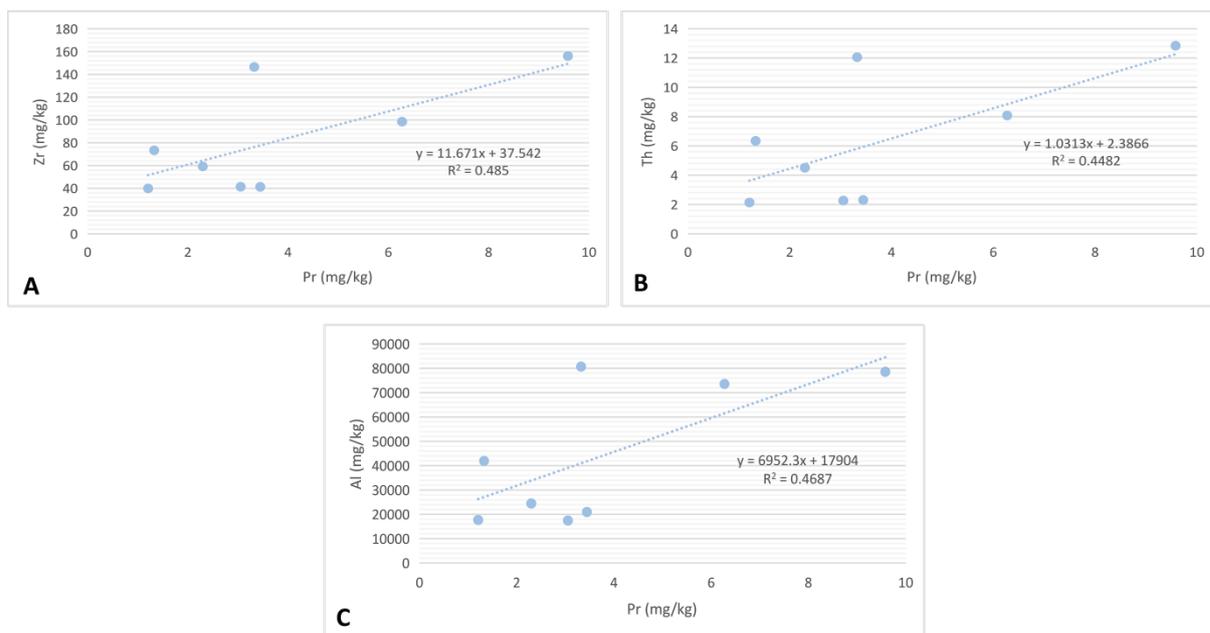
**Figura 6.7** - Gráficos com correlação linear positiva entre Ce e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” (respectivamente A, B e C). Em D, observa-se a correlação linear negativa entre o Ce e as concentrações de ferro para esse mesmo material.

### 6.2.3.3 Anomalia levemente negativa de Pr

No presente estudo, as amostras de solo “borra de café” apresentam os valores de  $Pr/Pr^*$  variando entre 0,34 a 1.10, tendo como média  $Pr/Pr^* = 0.81$  (Tabela 6.5). Em relação às anomalias de Pr, os resultados indicam valores levemente negativos (0.83 a 0.97) para as amostras dos Pontos 5, 11 e 64; e valores de anomalias negativas ( $<0.83$ ) para as amostras dos Pontos A3, 48 e 51. As amostras dos Pontos 02 e 10 apresentam os maiores valores para essa anomalia (respectivamente, 1.10 e 1.02), mas pouco interferem na ilustração do padrão de distribuição dos ETR + Y para o solo “borra de café” (Figura 6.6).

Assim, destaca-se o carácter inversamente proporcional encontrado entre as anomalias de Ce e de Pr, uma vez que anomalia positiva de Ce para determinada amostra acarretará uma anomalia de Pr negativa.

Dentre as correlações lineares expressivas encontradas para esse ETR, destacam-se: Nd ( $\rho = 0.98$ ), Sm ( $\rho = 0.92$ ), Eu ( $\rho = 0.92$ ), Gd ( $\rho = 0.96$ ), Tb ( $\rho = 0.98$ ), Dy ( $\rho = 0.98$ ), Ho ( $\rho = 0.95$ ) e Er ( $\rho = 0.91$ ). Contudo, as mais importantes são as correlações com Zr ( $\rho = 0.70$ ), Th ( $\rho = 0.67$ ) e Al ( $\rho = 0.68$ ) (Figura 6.8), uma vez que elas confirmam a origem terrígena dos ETR no solo “borra de café”.



**Figura 6.8** - Gráficos com correlação linear positiva entre Pr e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” (respectivamente A a C).

#### 6.2.3.4 Anomalia levemente positiva de Eu

O elemento químico Eu, tal como o Ce, possui diferentes estados de oxidação (Ce:  $Ce^{4+}$  e  $Ce^{3+}$ ; Eu:  $Eu^{3+}$  e  $Eu^{2+}$ ), apresentando fracionamentos significativos em relação a outros ETR o que os tornam elementos essenciais no rastreamento de condições redox (Compton *et al.* 2003).

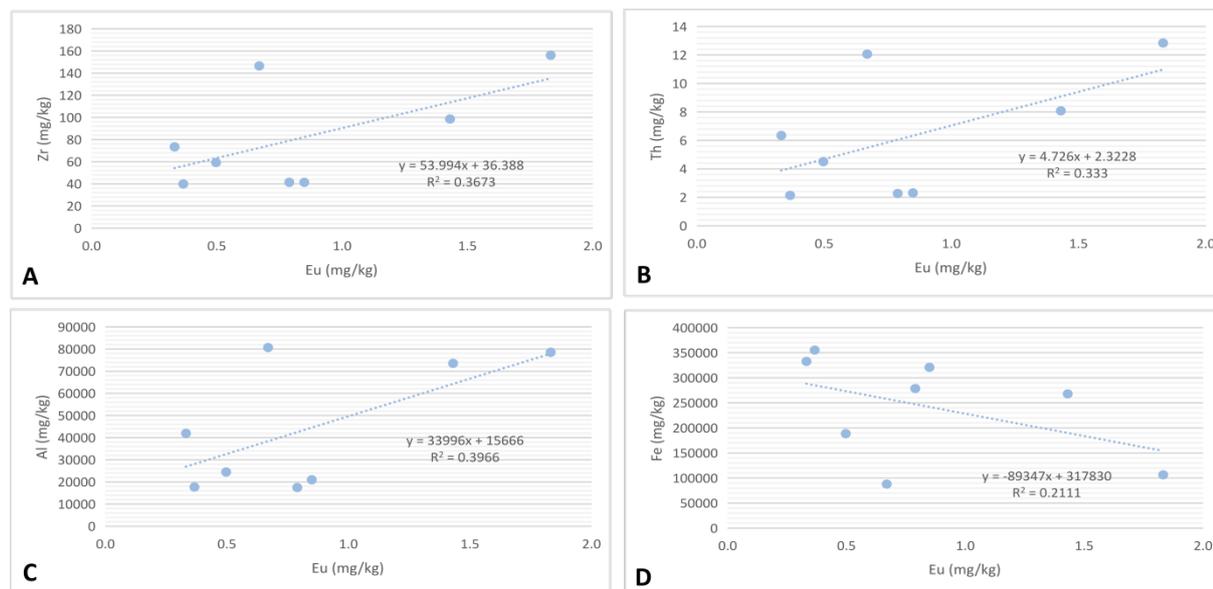
O potencial de redução do  $Eu^{3+}/Eu^{2+}$  em soluções aquosas depende principalmente da temperatura e, secundariamente, da pressão e do pH, o que explica as anomalias positivas de Eu normalmente encontradas em fluidos hidrotermais ácidos e redutores (Bau 1991). Diante disso, sabe-se que anomalias de Eu encontram-se geralmente associadas a ocorrências de hidrotermalismo e contaminação terrígena (Frimmel 2009).

No presente estudo, as amostras do solo de interesse apresentaram uma pequena variação nas anomalias de Eu ( $Eu/Eu^* = 1,14$  a  $1,38$ ), apresentando um valor médio ( $Eu/Eu^* = 1,29$ ). Logo, as anomalias de Eu observadas são positivas, com um padrão bem conforme para todas as amostras definidas como sendo de solo “borra de café”.

A origem das anomalias positivas de Eu em materiais de procedência carbonática marinha podem ser atribuídas também a uma diagênese intensa ou a variações no conteúdo de plagioclásio (Nogueira 2018, Laveuf *et al.* 2009). No entanto, a correlação linear levemente positiva entre Eu e elementos de carácter detrítico como Zr, Th e Al (coeficiente de correlação  $\rho = 0,61$ ,  $0,58$  e  $0,63$  respectivamente) (Figura 6.9), além de conhecimentos acerca da mineralogia do material parental dos solos “borra de café” (sem abundância em plagioclásios) suportam a não influência diagenética ou

mineralógica sobre este elemento, sugerindo uma origem detrítica (influência terrígena) para a presença de anomalias positivas de Eu.

Dentre as correlações lineares encontradas para o Eu, destacam-se: Pr ( $\rho = 0.92$ ), Nd ( $\rho = 0.97$ ), Sm ( $\rho = 0.99$ ), Gd ( $\rho = 0.98$ ), Tb ( $\rho = 0.97$ ), Dy ( $\rho = 0.92$ ). Ademais, observou-se que o La se correlaciona bem também positivamente com o Y ( $\rho = 0.76$ ) e La ( $\rho = 0.79$ ).



**Figura 6.9** - Gráficos com correlação linear positiva entre Eu e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” (respectivamente A, B e C). Em D, observa-se a correlação linear negativa entre o Eu e as concentrações de ferro para esse mesmo material.

Destaca-se ainda que não se observaram os efeitos de processos de hidrotermalismo nas amostras de solo “borra de café”, isso com base nas variações das concentrações da razão  $Eu/Eu^*$  e nas descrições macroscópicas desse material. O que se observou foi que os materiais terrígenos possivelmente teriam uma origem advinda de uma contribuição aquosa, que contribuiu para a remoção de hidróxido de ferro do meio. Essa situação, também retratada anteriormente no item sobre anomalia de Ce, pode ser observada através da correlação linear negativa entre o Eu e o Fe ( $\rho = 0.46$ )(Figura 6.9 - D), que caracteriza uma depleção do ferro nas amostras de solos “borra de café” pela água em algum momento de sua evolução pedogênica.

### 6.2.3.5 Anomalia levemente positiva de La

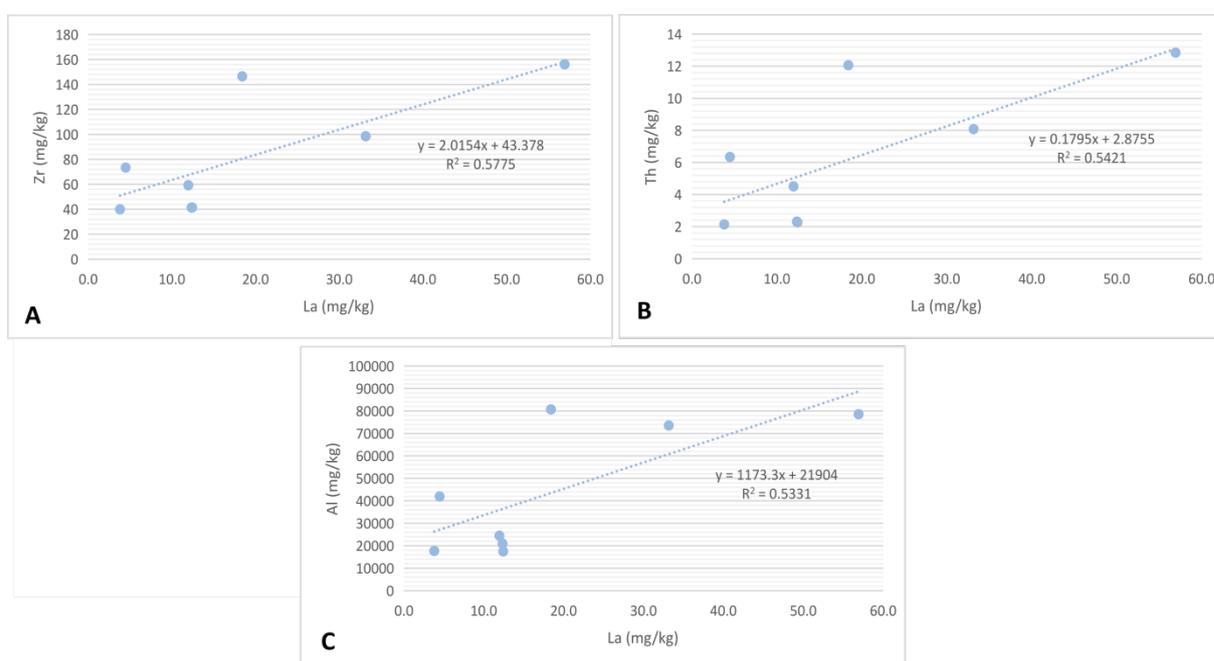
A concentração de La, normalmente, é muito maior em relação aos outros ETR leves na água do mar, indicando na geoquímica amostras com um caráter marinho de precipitação (Bolhar *et al.* 2004).

As amostras de solo “borra de café” coletadas apresentam razões de  $La/La^*$  variando entre 0.77 a 1.41, com média  $La/La^* = 1.08$  (Tabela 6.5). Em relação às anomalias, ocorrem como

levemente positivas (0.77 a 1.06) para as amostras dos Pontos 2, 5, 10 e 51; e como anomalias positivas (>1.06) para as amostras dos Pontos A3, 48, 64 e 11.

Destaca-se que no geral as anomalias positivas de La são pouco evidentes no diagrama de ETR + Y, normalizado pelo PAAS (Figura 6.6), devido aos contrastes entre as concentrações dos seus vizinhos Ce e Pr, ou seja, a disposição próxima entre anomalias positivas e negativas.

Ademais, observou-se que o La se correlaciona melhor com o Y do que com outros ETR leves (coeficiente de correlação  $\rho = 0.91$ ). Contudo, as mais importantes são as correlações com Zr ( $\rho = 0.76$ ), Th ( $\rho = 0.74$ ) e Al ( $\rho = 0.73$ ) (Figura 6.10), uma vez que elas confirmam a origem terrígena dos ETR no solo “borra de café”.



**Figura 6.10** - Gráficos com correlação linear positiva entre La e os elementos químicos Zr, Th e Al analisados nas amostras definidas como sendo de solo “borra de café” (respectivamente A, B e C).

### DISCUSSÃO GERAL E CONCLUSÕES FINAIS

---

O desenvolvimento do presente estudo exploratório ao longo do Sinclinal Dom Bosco possibilitou a avaliação geológica de domínios litológicos e pedológicos carbonatados oriundos dos Grupos Itabira e Piracicaba, a fim de caracterizar o solo de interesse denominado “borra de café” em termos de seus aspectos físicos, ou seja, através de uma descrição macroscópica detalhada de seus padrões texturais, estruturais e de cores, e também em termos de seus aspectos geoquímicos, com as determinações das concentrações dos elementos maiores, menores e traço (incluindo os ETR) obtidas através de análises de ICP-OES e ICP-MS. Toda essa classificação pormenorizada de sua composição e disposição permitiram verificar em que condições específicas esses solos adquirem o aspecto visual característico da “borra de café”.

Os solos “borra de café” se apresentam como um material pedológico acastanhado variando de nuances mais claras a mais escuras. Em relação a classificação de sua cor, a notação mais representativa encontrada é a 7.5YR 3/4 (*dark brown*), obtida pela comparação visual deste material com a Carta de Munsell. Já a classificação textural mais representativa dos solos “borra de café” é a franco-argilo-siltosa, ou seja, moderadamente fina, com 40-70% de silte, 30-40% de argila e 0-20% de areia. A forma estrutural predominante encontrada é a granular, sendo comum também a presença de formas como blocos subangulares e angulares. Na descrição da estrutura do solo, não é observada somente a forma das unidades estruturais, mas também o tamanho e o grau de desenvolvimento. No caso do solo “borra de café” mapeado, os tamanhos observados variam de pequeno a grande e o grau de desenvolvimento referente à manifestação das condições de coesão dentro e fora dos agregados é tido como majoritariamente fraco.

No que diz respeito à consistência do solo “borra de café”, quando observada a seco, predomina-se como ligeiramente dura caracterizada como sendo fracamente resistente à pressão e facilmente quebrável entre o polegar e o indicador. Para o solo úmido, observa-se um comportamento muito friável, ou seja, o material do solo esboroa-se com pressão muito leve, e agrega-se por compressão posterior. Quando molhado, o solo “borra de café” comporta-se majoritariamente como ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso, apresentando-se também com plástico e pegajoso.

É comum encontrar nos solos “borra de café” a presença de pequenas estruturas nodulares (concreções minerais) milimétricas de significativa resistência à compressão manual e que possuem tonalidade castanho-amareladas a castanho-avermelhadas, com provável composição de Fe/Mn/Al, caracterizando óxidos desses elementos. A presença de tais elementos é muito comum nesses solos, sendo possivelmente nódulos ferro-manganesíferos.

Além disso, pode-se observar fragmentos centimétricos subarredondados a subangulosos alterados, sendo alguns bem rígidos e medianamente densos - possivelmente hematíticos e itabiritos se comportando como resistatos imersos nesses solos. A presença de fragmentos de filitos prateados imersos nesses solos também é observado, o que pode justificar a composição argilosa dos solos “borra de café” ao funcionar como fonte de argilominerais como filossilicatos. A fração argila exerce um importante controle na consistência do solo “borra de café”, uma vez que quanto mais argiloso o solo, maior a expressão das forças de coesão e adesão responsáveis por sua consistência.

Em relação a sua origem, o material parental predominante para esses solos advém de litotipos carbonáticos encontrados, respectivamente, em maior para menor frequência, nos litotipos da Formação Gandarela, da Formação Cercadinho e da Formação Fecho do Funil. Contudo, desconsiderou-se litologias de uma formação geológica apenas como detentora de materiais parentais para esses solos, ocorrendo, assim, a influência de filitos prateados, itabiritos e rochas carbonáticas para a formulação dos solos “borra de café”.

A constante presença de litologias ferruginosas da Formação Cauê nas proximidades espaciais do solo “borra de café” influenciaram a formação desses solos através da contribuição e fornecimento de elementos químicos como ferro e manganês para sua composição, que resultaram na formação de estruturas, como por exemplo, concreções minerais. Destaca-se a presença de drenagens nas proximidades de sua ocorrência, que contribuem para a mobilização de elementos químicos na região do Sinclinal Dom Bosco, como por exemplo o Fe.

Geoquimicamente, o espectro de ETR + Y normalizado pelo PAAS (*Post-Archean Australian Shale*) para o solo “borra de café” estudado possui comportamentos comuns aos levantados em litologias do Grupo Itabira (no caso, Formações Gandarela e Cauê), o que é justificável, visto sua composição parental e sua disposição espacial próximas a litologias ferruginosas.

Observa-se que o padrão comportamental do solo “borra de café” ilustra um enriquecimento dos ETR pesados em relação aos ETR leves, mesmo que mais suave (padrão quase plano) do que o observado nas rochas carbonáticas e itabiríticas. As razões de  $(La/Yb)_N$ ,  $(Nd/Yb)_N$  e  $(Pr/Yb)_N$  encontradas para esse solo foram majoritariamente negativas e retratam o padrão observado com pequena depleção em ETR leves em comparação aos pesados. Ademais, apresenta anomalias positivas de Eu e de Y (razão Y/Ho) bem expressivas. Entretanto, no que diz respeito às anomalias de Ce, nos solos “borra de café” elas se mostram expressivamente mais positivas, diferentes das negativas encontradas nos carbonatos da Formação Gandarela.

No presente estudo, os teores de Y encontrados não chegam a permitir que as amostras analisadas alcancem as elevadas razões Y/Ho (não normalizadas pelo PAAS) necessárias para se atingir a assinatura da água do mar esperadas para um material carbonático típico marinho. Isso se deve ao fato do material estudado ser condizente com o de um produto pedológico carbonatado, que

em algum momento sofreu a influência de contaminação detrítica. Essa contaminação, provavelmente, originou-se através de materiais terrígenos transportados por águas continentais, que resultaram, por fim, no mascaramento da assinatura geoquímica da água do mar dos carbonatos parentais.

A origem terrígena de ETR no solo “borra de café” analisada ao longo do Sinclinal Dom Bosco foi confirmada pelas correlações positivas existentes entre o  $\Sigma$  ETR, Ce e Eu com elementos detríticos Al, Th e Zr. As concentrações de Ce versus Fe atuaram como indicadores da influência de águas na região responsáveis pelo transporte de colóides ricos de Fe, confirmando a origem não siliciclástica desse elemento. A correlação negativa entre Ce e Fe representa a existência de uma depleção do ferro nas amostras de solos “borra de café” em algum momento de sua evolução pedogênica, que resultou na formação de nódulos de ferro-manganesíferos comuns nesse solo.

Com os resultados obtidos e as discussões apresentadas tornou-se possível alcançar todos os objetivos propostos no presente estudo. Ademais, dada a importância e questionamentos existentes em relação à temática explorada, sugere-se para as próximas pesquisas:

1) Aprofundar a caracterização química desse solo, buscando-se estimar os teores de matéria orgânica e de isótopos estáveis de oxigênio. Tudo isso para por fim compará-los com os valores correspondentes obtidos para seus materiais parentais na revisão literária da geoquímica regional.

2) Um detalhamento geoquímico da constituição mineralógica do solo “borra de café” por meio da utilização do Método de Difração de Raios-X nas amostras classificadas. Objetiva-se o melhor esclarecimento acerca da mineralogia presente nesse solo e também a desmistificação da origem da anomalia positiva de Ce, no caso se estaria ligada a presença do mineral florencita no material ou se teria advindo realmente da incorporação de Ce em óxidos e hidróxidos de ferro/manganês (concreções minerais).

3) Trabalhar a disposição da geofísica ao longo do Sinclinal Dom Bosco através do estudo de mapas aerogamaespectométricos e aeromagnéticos com a finalidade de discutir e correlacionar a geoquímica elementar analisada com a presença de eventuais anomalias, como por exemplo, as de Fator F. Além da realização de um levantamento geológico estrutural das entidades remanescentes presente nos saprólitos da região e sua consequente provável influência para a formulação de solos na região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Alfaro M. R., do Nascimento C.W.A., Biondi C.M., da Silva Y., Accioly A., Montero A., Ugarte O.M., Estevez J. 2018. Rare-earth-element geochemistry in soils developed in different geological settings of Cuba. *Catena*, 162: 317–324.
- Alkmim A. R. 2014. Investigação geoquímica e estratigráfica da Formação Ferrífera Cauê a porção centro oriental do Quadrilátero Ferrífero, MG. MS Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 178p.
- Alkmim F.F, Marshak, S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region. Minas Gerais, Brazil: Evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90 (1-2)**: 29-58.
- Almeida F. F. M. 1977. O Craton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, **7(4)**: 349-364.
- Almeida L. G. 2004. *Estratigrafia e geologia estrutural da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero–Minas Gerais*. Tese de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 136p.
- Andrade O. C. S. 2020. Por que é importante entender as cores do solo?. Disponível em: <https://www.3rlab.com.br/2020/09/08/por-que-e-importante-entender-as-diferentes-cores-do-solo/>. Acessado em 24 nov 2021.
- Araújo J. C. S., Lobato L. M. 2019. Deposition model for banded iron formation host to gold in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Brazil, based on geochemistry and LA-ICPMS magnetite analyses. *Journal of South American Earth Sciences*, **94**: 102-205.
- Araújo T. G. R. 2018. *Fingerprint e estudo cristalóquímico do topázio imperial da região de Ouro Preto (Minas Gerais, Brasil)*. Tese de Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 184 p.
- Aubert D., Stille P., Probst A., Gauthier-Lafaye F., Pourcelot L., Del Nero M. 2002. Characterization and migration of atmospheric REE in soils and surface waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (19): 3339–3350.
- Baltazar O. F., Lobato L. M. 2020. Structural Evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Influence of Proterozoic Orogenies on Its Western Archean Gold Deposits. *Minerals*, **10(11)**: 983.

- Baltazar O. F., Zucchetti M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, **32(3-4)**: 471-499.
- Barbosa G. V., & Rodrigues D. M. S. 1965. O Quadrilátero Ferrífero e seus problemas geomorfológicos. *Boletim Mineiro de Geografia*, 10/11: 3-35.
- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 93: 219–230.
- Bekker A., Sial A. N., Karhu J. A., Ferreira V. P., Noce C. M., Kaufman A. J., Romano A. W., Pimentel M. M., 2003. Chemostratigraphy of carbonates from the Minas supergroup, Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle), Brazil: a stratigraphic record of the Early proterozoic atmospheric, biogeochemical and climatic change. *American Journal of Science*, 303: 865-904.
- Bolhar R., Kamber B.S., Moorbath S., Fedo C.M., Whitehouse M.J. 2004. Characterization of early Archaean chemical sediments by trace element signatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 43-60.
- Carvalho Filho A. D. 2008. Solos e ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos Tabuleiros Costeiros. Tese de doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 256 p.
- Carvalho Filho A. D., Curi N., Marques J. J. G. D. S., Shinzato E., Freitas D. A. F. D., Jesus E. A. D., Massahud R. T. L. R. 2011. Óxidos de manganês em solos do quadrilátero ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 793-804.
- Carvalho Filho A. D., Curi N., Shinzato E. 2010. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45: 903-916.
- Castro E. C. C. & Ferreira J. E.. 1997. *Aspectos estratigráficos, sedimentares e estruturais dos sedimentos cenozoicos da borda leste do Quadrilátero Ferrífero entre Santa Rita Durão e Fonseca, Minas Gerais*. Trabalho Final de Graduação, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 49 p.
- Castro E. C. C., Ferreira J. E., Castro P. de T. A.. 1998. *Formação Cata Preta: uma nova unidade estratigráfica definida em rochas cenozóicas no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero - MG*. In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, 1998, Belo Horizonte. *Anais do XL Congr. Bras. de Geol.* Belo Horizonte, 1: 82-82.
- Chemale Jr. F., Rosière C.A., Endo I. 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero – Um

modelo. *Pesquisas em Geociências*, **18(2)**: 104-127.

Compton J.S., White R.A., Smith M. 2003. Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the Western Cape, South Africa. *Chem. Geol.*, 201: 239–255.

Dorr II J.V.N. 1969. *Physiographic, Stratigraphic and Structural development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil*. Geological Survey Professional Paper 641-A, Washington, D.C., United States Government Printing Office, 110p.

Dussin T. M. 1994. *Associations volcano-plutoniques de l'Espinhaço méridional (SE-Brésil): Un exemple d'évolution de la croûte Protérozoïque*. Tese de Doutorado, Univ. D'Orleans, França, 177p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária . Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

Endo I. 1997. *Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozoico no interior da placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 328p.

Endo I., Castro P.T.A., Gandini A.L. 2020. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto, 480 p.

Endo I., Delgado C. E. R., Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Carlos D. U., Galbiatti H. F., Castro P. de T. A., Suiça M. T. de F., Barbosa M. S. C., Lana C. E., Moura L. G. B. de. 2019b. *Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000*. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: [www.qfe2050.ufop.br](http://www.qfe2050.ufop.br).

Endo I., Galbiatti H. F., Delgado C. E. R., Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Moura L. G. B. de, Peres G. G., Oliveira A. H. de, Zavaglia G., Danderfer Fº A., Gomes C. J. S., Carneiro M. A., Nalini Jr. H. A., Castro P de T. A., Suiça M. T. de F., Tazava E., Lana C. de C., Martins-Neto M. A., Martins M. de S., Ferreira Fº F. A., Franco A. P., Almeida L. G., Rossi D. Q., Angeli G., Madeira T. J. A., Piassa L. R. A., Mariano D. F., Carlos D. U.. 2019a. *Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969)*.Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: [www.qfe2050.ufop.br](http://www.qfe2050.ufop.br).

- Endo I., Oliveira A. H., Peres G. G., Guimarães M. L. V., Lagoeiro L. E., Machado R., Zavaglia. G., Rosas C. F. Melo R. J. 2005. Nappe Curral: Uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. In: X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos/IV International Symposium on Tectonics, Curitiba, *Boletim de Resumos Expandidos*, 279-282.
- Endo I., Rosière C. A., Chemale Júnior, F. 1992. Roteiro da excursão geológica no Quadrilátero Ferrífero e regiões adjacentes. *Revista da Escola de Minas*, Minas Gerais, **45**: 1- 69.
- Endo I., Silva L.G., Zavaglia G. 2004a. Mapeamento Geológico, Estratigrafia e Arcabouço Estrutural. Projeto Brucutu - Dois Irmãos, Convênio CVRD\_UFOP, Relatório Interno. 38p.
- Estados Unidos. 1993. Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. Soil Survey Manual. Washington, D.C. 437 p. Revised and enlarged edition. (USDA. Agriculture Handbook, 18).
- Farina F., Albert C., Dopico C.M., Gil C.A., Moreira H., Hippertt J.P., Lana C. 2016. The Archean Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**: 4-21.
- Fraga L. M. B. 1992. *Estrutura da região do Morro do Bule, Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 130p.
- Frimmel H. E. 2009. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator. *Chemical Geology*, 258: 338-353.
- Frimmel H. E. 2010. On the reliability of stable carbon isotopes for Neoproterozoic chemostratigraphic correlation. *Precambrian Research*, [s. l.], 182(4): p. 239–253.
- Gandini A. L. 1994. *Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 229 p.
- Gorceix C. H. 1884. Bacias terciárias de água doce nos arredores de Ouro Preto (Gandarela e Fonseca), Minas Gerais, Brasil: Ouro Preto, Escola de Minas, Annaes, nº. 3, p. 95-114.
- Guild P. W. 1957. *Geology and mineral resources of the Congonhas district, Minas Gerais, Brazil*. Geological Survey Professional Paper 290, Washington, D.C., United States Government Printing Office, 98p.
- Guitarrari M.M., 1999. Petrografia e Geoquímica dos Metassedimentos Turbidíticos dos Grupos Nova Lima e Sabará no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 101 p.

- Henderson P. 1984. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. *Rare earth element geochemistry*, [s. l.], 2(1): 32.
- Jacobi C. M., Carmo F. F. 2008. Diversidade dos campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Megadiversidade*, 4 (1-2): 24-32.
- Kwitko-Ribeiro R., de Oliveira C.G. 2004. O depósito aurífero de Antônio Pereira, Quadrilátero Ferrífero: condições P-T e natureza dos fluidos mineralizadores. *Revista Brasileira de Geociências*, **34(1)**: 117-126.
- Ladeira E.A. 1980. *Metalogenesis of Gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. PhD Thesis, University of Western Ontario, Canadá, 272p.
- Laveuf C., Cornu S. 2009. A review on the potentiality of Rare Earth Elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma*, **154(1-2)**: 1-12.
- Laveuf C., Cornu S. Juillot, F. 2008. Rare earth elements as tracers of pedogenetic processes. *C. R. Geoscience*, **340**: 523-532.
- Lawrence M. G. et al. 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways. *Aquatic Geochemistry*, 12(1): 39-72.
- Lefebvre J. J., Gasparrini C. 1980. Florencite, an occurrence in the Zairian copperbelt. *The Canadian Mineralogist*, **18(3)**: 301-311.
- Machado N., Schrank A., Abreu F. D., Knauer L. G., Almeida Abreu P. A. 1989. Resultados preliminares da geocronologia U-Pb na Serra do Espinhaço Meridional. *Boletim do Núcleo Minas Gerais - Sociedade Brasileira de Geologia*, **10**: 171-174.
- Maizatto J. R. 2001. *Análise bioestratigráfica, paleoecológica e sedimentológica das bacias terciárias do Gandarela e Fonseca - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, com base nos aspectos palinológicos e sedimentares*. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 333p.
- Marshak S., Alkmim F.F. 1989. Proterozoic extension/contraction tectonics of the southern São Francisco Craton and adjacent regions, Minas Gerais, Brazil: A kinematic model relating Quadrilátero Ferrífero, São Francisco Basin and Cordillera do Espinhaço. *Tectonics*, **8(3)**: 555-571.
- Martins C., Lima P. C. R., Teixeira L. S., Teixeira M. P., Queiroz Filho A. P. 2014. *Minerais estratégicos e terras-raras*. Centro de Documentação e Informação, Edições Câmara. Brasília,

DF, Série de estudos estratégicos, nº 3, 237 p.

Maxwell C.H. 1972. *Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil*. Geological Survey Professional Paper 341-J, Washington, D.C., United States Government Printing Office, 72p.

McLennan S.M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169-200.

McLennan S.M., Taylor S.R. 1991. Sedimentary Rocks and Crustal Evolution – Tectonic Setting and Secular Trends. *Journal of Geology*, 99(1): 1-21.

Mendes, M. D. C. O. 2015. Gênese dos itabiritos e minérios hipogênicos do Quadrilátero Ferrífero com base em geoquímica e isótopos de ferro e geocronologia de rochas associadas. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 248 p.

Minter W. E. L., Renger F. E., Sierges A. 1990. Early Proterozoic gold placers of the Moeda Formation within the Gandarela Syncline, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 85: 943-951.

Nagarajan R., Madhavaraju J., Armstrong-Altrin J.S., Nagendra R. 2011. Geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima Basin, Karnataka, Southern India. *Geosciences Journal*, 15: 9-25.

Navarro M. S. 2004. *A implantação de rotina, e seu refinamento, para a determinação de elementos terras raras em materiais geológicos por ICP-OES e ICP-MS. Aplicação ao caso dos granitóides de Piedade-Ibiúna (SP) e Cunhaporanga (PR)*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 143 p.

Nogueira L. B. 2018. *Estudo geoquímico e isotópico de rochas carbonáticas das formações gandarela e fecho do funil – Quadrilátero Ferrífero - Brasil*. Tese de Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 145 p.

Nogueira L. B., Oliveira V. Q., Araújo L. P., Leão L. P., Ali A., Leite M. G. P., Nalini Jr H. A., Banerjee N. R. 2019. Geochemistry and C and O isotope composition of carbonate rocks from Bemil and Lagoa Seca quarries, Gandarela Formation, Quadrilátero Ferrífero-Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **92**: 609-630.

Nogueira L.B., Oliveira V.Q., Sampaio G.M., Leite M.P.G., Ali A., Abreu A.T., Nalini Jr. H.A., Banerjee N.R. 2017. Elemental and stable isotopes geochemistry of Paleoproterozoic dolomites from Fecho do Funil Formation, Quadrilátero Ferrífero – Brazil. *Journal of South American*

Earth Sciences. 79: 525-536.

- Öhlander B., Land M., Ingri J., Widerlund A. 1996. Mobility of rare earth elements during weathering of till in northern Sweden. *Applied Geochemistry*, 11: 93-99.
- Oliveira R. T., Rocha L. C. D., Rocha I. G., & de Lima Fiorillo C. A. 2010. Caracterização física dos solos sob diferentes usos. *Revista Agrogeoambiental*, 2(1).
- Planavsky N., Bekker A., Rouxel O.J., Kamber B., Hofmann A., Knudsen A., Lyons T.W. 2010. Rare Earth Element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: New perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 6387-6405.
- Renger F. E., Noce C. M., Romano A. W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*. 2(1): 1-11.
- Resende M., Curi N., Rezende S.B., Corrêa G.F. 2007. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 5. ed. Lavras, Editora da UFLA, 322p.
- Rhyne T. M. 2015. The Conical Spiral & Color Harmony. Disponível em: <https://munsell.com/color-blog/conical-spiral-color-harmony/>. Acessado em 24 nov 2021.
- Sant'anna L.G. 1994. *Mineralogia das argilas e evolução geológica da bacia de Fonseca, Minas Gerais*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 151p.
- Santos R. D., Lemos R. D., Santos H. G., Ker J. C., Anjos L. H. C. (eds.). 2005. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 84, 101 p.
- Schorscher H.D. 1978. Komatiitos na estrutura "Greenstone belt" Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *In: 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Resumos*, v. 30, p. 292-293.
- Schorscher H.D. 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento Arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 51(4):767-768.
- Sholkovitz E. R., Landing W.M., Lewis B.L. 1994. Ocean particle chemistry: the fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 1567 – 1579.
- Silva A.M., Chemale Jr. F., Kuyumjian R.M., Heaman L. 1995. Mafic dikes swarms of Quadrilátero

Chimini A. P. 2022. Caracterização geoquímica de solos do Sinclinal Dom Bosco com destaque para ocorrências ...

Ferrífero and Southern Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **25(2)**: 124-137.

Tempo Agora. Disponível em: <https://www.tempoagora.com.br/previsao-do-tempo/mg/OuroPreto>. Acessado em 13 out 2021.

Uhlein A. & Noce C. M. 2012. Quadrilátero Ferrífero. In: Hasui Y., Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M., Bartorelli A. (eds). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 228 - 229.

Van Acken D., Hoffmann J. E., Schorscher J. H. D., Schulz T., Heuser A., Luguet A. 2015. Formation of high-Al komatiites from the Mesoarchean Quebra Osso Group, Minas Gerais, Brazil: Trace elements, HSE systematics and Os isotopic signatures. *Chem. Geol.* **422**: 108–121.

Verzutti J. 2021. Estrutura do Solo: Classificação e o Manejo do Solo. Disponível em: <https://agropos.com.br/estrutura-do-solo/>. Acessado em 24 nov 2021.

Villaça, J. N. 1981. Alguns aspectos sedimentares da Formação Moeda. *Sociedade. Bras. Geologia, Núcleo MG*, 2: 92-137.

Zucchetti M. 1998. *Geoquímica dos metabasaltos do Grupo Nova Lima, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 135 p.

## Apêndices

**A - Tabela com a descrição física dos materiais amostrados**

PONTO	COR	CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	GRAU DE DESENVOLVIMENTO	POROSIDADE	CONSISTÊNCIA			OBSERVAÇÃO
	<i>Carta de Munsell</i>		<i>Agregação (estrutura em blocos subangulares) ou sem agregação (grãos simples e maciço) e tamanho</i>	<i>Fraço, moderado e forte</i>		<i>SECA (dureza)</i>	<i>ÚMIDA (friabilidade)</i>	<i>MOLHADO (plasticidade e pagajosidade)</i>	<i>Nódulos e concreções minerais, presença de sulfetos, carbonatos..</i>
P01	7.5YR 7/1	franco arenosa (subangulosa)	estrutura granular média	Forte	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Muito dura	Solta	Não plástico, não pegajoso	Mistura de solo arenoso acinzentado com rocha-matriz pouco alterada, caracterizando Horizonte C. É possível observar com clareza lineações minerais (biotitas e óxidos de Fe e Mn) e foliação da rocha (micas). Possui na região de descontinuidades centimétricas a presença pontual de minerais de ferro alterados esféricos marcados por coloração acastanhada.
P02	5YR 3/4	franco-argilo-siltosa	estrutura granular pequena	Fraca	Sem poros visíveis	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Solo acastanhado, possivelmente borra de café, com alguns fragmentos centimétricos alterados amarelo-acastanhados de rocha com alto conteúdo de ferro (possivelmente itabiritos). Horizonte B.
P05	7.5YR 3/4	franco-argilo-siltosa	estrutura granular pequena	Fraca	Sem poros visíveis	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Solo acastanhado, possivelmente borra de café, com alguns fragmentos milimétricos de grãos de quartzo e de hematita. Horizonte B.
P9 - BASE	5YR 7/1	franco-siltosa	estrutura granular pequena	Fraca	Sem poros visíveis	Macia	Solta	Não plástico, não pegajoso	Base com solo acinzentado, caracterizando um saprolito de rocha arenosa com mergulho do acamamento aproximadamente pra SE.

P9 - TOPO	7.5YR 4/4	franca (subanguloso)	estrutura de blocos subangulares médios e estrutura granular pequena a média	Fraca	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Friável	Não plástico, ligeiramente pegajoso	Solo acastanhado, possivelmente um borra de café mais claro com a presença de fragmentos centimétricos alterados de rochas como filitos e itabiritos. Possui também fragmentos centimétricos densos e resistentes com foliação evidente, provavelmente hematitos e itabiritos.
P10	7.5YR 4/4	franco-argilo-siltosa	estrutura granular pequena	Fraca	Sem poros visíveis	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Ponto 5 metros acima do P11. Solo acastanhado, possivelmente borra de café com a presença de fragmentos centimétricos subarredondados alterados, sendo alguns bem rígidos e medianamente densos - possivelmente hematitos e itabiritos se comportando como resistatos. Presença de pequenas estruturas nodulares (concreções minerais) milimétricas castanho-amareladas, com provável composição de Fe/Mn/Al (óxidos).
P11 - BASE	5YR 7/6	argilosa	estrutura de blocos subangulares médios a grandes	Moderada	Sem poros visíveis	Dura	Firme	Plástico, pegajoso	Solo amarelado compactado em algumas porções, formando torrões. Nele existe também a presença de estrutura mosqueada - tons avermelhados, amarelados e esbranquiçados.
P11 - TOPO	5YR 5/8	argilo-siltosa	estrutura de blocos angulares médios a grandes	Moderada	Sem poros visíveis	Dura	Firme	Plástico, pegajoso	Solo castanho-amarelado, possivelmente um borra de café mais claro que os anteriores. Possui conteúdo argiloso em maior quantidade e concreções minerais esféricas milimétricas de óxidos de ferro (pretas). Presença de crosta ferruginosa como uma fina camada (canga).
PAlúvio01 (após P11)	7.5YR 5/3	areia franca (subarredondado)	estrutura granular pequena	Fraca	Sem poros visíveis	Solta	Solta	Não plástico, não pegajoso	Solo de depósito marginal aluvial (margem direita) abaixo da ponte que fica ao lado do P11, apresenta composição arenosa e coloração acinzentada-acastanhada. Possui fragmentos de rochas e minerais abundantemente na fração milimétrica (micas, filitos, hematitos, quartzos, hematitas) com comportamentos subarredondado a arredondado.

P19	5YR 8/4	franco-argilo-arenosa (subangulosa)	estrutura granular pequena a média	Forte	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Muito dura	Firme	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Saprolito de uma intercalação entre rochas xistosas e quartzosas (quartzíticas). Coloração rosada clara e com presença clara das foliações, lineações minerais e acamamento da rocha. Possui grande quantidade de hematita alterada.
P20	2.5YR 7/6	argilosa	estrutura de blocos angulares médios a grandes	Moderada	Sem poros visíveis	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástico, pegajoso	Saprolito de xisto prateado (coletado na cabeceira de uma voçoroca no nível da estrada). Coloração rosada, bastante alterado, porém ainda é possível observar foliações e lineamentos na rocha. Possui óxidos de ferro alterados (pontos milimétricos).
P30	10YR 8/1	argilosa	estrutura laminar grande a muito grande	Forte	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Saprolito de filito prateado bem alterado. É possível observar ainda as foliações e lineamento minerais. Possui hematitas milimétricas alteradas (pontos escuros).
P37	7.5YR 7/3	franco-argilosa	estrutura laminar muito grande	Maciço - coerente	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Muito dura	Muito firme	Não plástico, não pegajoso	Filito prateado pouco alterado. Estruturas da rocha bem preservadas (xistosidade, foliação). Saprolito bem conservado, com pouco material desagregado.
P44	5YR 5/6	franco-argilo-siltosa	estrutura granular grande a muito grande	Fraca	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Solo ferruginoso, possivelmente borra de café, com fragmentos rochosos de tonalidade marrom escuro (aspecto arroxeadado quando molhado). Muito rico em óxidos de ferro.
P45	2.5YR 5/8	argiloso	estrutura de blocos angulares muito grandes	Maciço - coerente	Sem poros visíveis	Muito dura	Firme	Ligeiramente plástico, pegajoso	Saprolito de xisto avermelhado, bem consistente. Estruturas residuais da rocha (foliações) são reconhecidas com dificuldade.
P46	5YR 7/6	argilosa	estrutura granular média a grande	Fraca	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Firme	Plástico, pegajoso	Solo mosqueado argiloso (vermelho e branco – caulim provavelmente) com pequenos pontos amarelado (bem poucos).
P47	5YR 5/8	franco-argilo-siltosa	estrutura de blocos angulares médios a grandes	Moderada	Sem poros visíveis	Dura	Muito firme	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Saprolito de rocha bandada/foliada em tons castanho vivo, provavelmente um itabirito. Moderadamente resistente, e com estruturas residuais parcialmente preservadas (acamamento e foliação). Coloração semelhante ao do borra de café.

P48	7.5YR 3/2	franco-argilo-siltosa	estrutura granular pequena a média	Fraca	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Muito friável	Plástico, pegajoso	Solo muito escuro, sem estruturas, com bolsões de material arenoso amarelado observado em campo. Provavelmente borra de café. Quando molhado apresenta coloração roxo escuro.
P51	2.5YR 2.5/3	franco-argilo-siltosa	estrutura granular média	Fraca	Sem poros visíveis	Dura	Muito firme	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Solo ferruginoso catanho-avermelhado com muitas concreções minerais esféricas de ferro (de significativa resistência a compressão). Coloração semelhante ao que classificamos como borra de café.
P53	2.5YR 3/6	franco-siltosa	estrutura granular média a grande e estrutura de blocos subangulares muito grandes	Fraca	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Solo castanho muito avermelhado, possivelmente um borra de café às margens da rodovia BR-040. Apresenta concreções minerais milimétricas e esféricas resistentes de ferro e torrões subangulosos com mais de 5 cm.
P57	7.5YR 6/3	argilosa	estrutura de blocos subangulares médios a grandes	Fraca	Sem poros visíveis	Macia	Muito friável	Plástico, pegajoso	Saprolito de filito prateado bastante alterado (pouca preservação de estruturas). Consistência argilosa.
P62 - BASE	7.5YR 6/2	franco-siltosa	estrutura laminar grande a muito grande	Moderada	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Saprolito de filito prateado alterado, com preservação moderada de sua foliação, acamamento e xistosidades. Consistência mais siltosa. Óxidos de ferro em quantidade muito pouca e de tamanho muito pequeno <1mm.
P62 - TOPO	7.5YR 6/6	franco-argilo-siltosa	estrutura grumosa média	Fraca	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Ligeiramente dura	Friável	Plástico, pegajoso	Solo mais claro que o borra de café (castanho claro) com grumos milimétricos. Possui concreções minerais subangulares milimétricas de óxidos de ferro (pretas).
P63	5YR 7/8	argilosa	estrutura de blocos subangulares médios a grandes	Fraca	Sem poros visíveis	Dura	Friável	Plástico, pegajoso	Solo amarelado argiloso compactado em algumas porções, formando torrões. Presença de fragmentos centimétricos de xistos, filitos e itabiritos. Possui concreções minerais subangulares milimétricas de óxidos de ferro (pretas) - hematitas de resistência considerável, que se aglomeram com matriz argilosa.

P64 - BASE	7.5YR 6/4	franco-siltosa	estrutura laminar grande a muito grande	Fraca	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Macia	Muito friável	Não plástico, não pegajoso	Intercalação entre rochas semelhantes às dos pontos 01 e 65. Saprolito de rocha xistosa acinzentada com porções avermelhadas (contaminação com ferro ?) e rocha itabirítica acinzentada (com aspecto "esfarelento" da hematita). Encontra-se bem preservados, podendo-se observar suas estruturas (xistosidades e foliações). Consistência silto-arenosa.
P64 - TOPO	7.5YR 6/6	argilosa	estrutura de blocos angulares muito grandes	Fraca	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Muito friável	Plástico, pegajoso	Solo castanho claro argiloso, ocorrendo na forma de torrões centimétricos resistentes. Possivelmente um borra de café mais argiloso. Possui fragmentos de milimétricos bem alterado de filitos.
P65 - BASE	7.5YR 6/2	argilo-siltosa	estrutura laminar grande a muito grande	Moderada	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso	Saprolito de xisto/filito prateado bem preservado, podendo-se observar suas estruturas (xistosidades e foliações). Consistência silto-arenosa com fragmentos milimétricos de filito prateado. Não se observa óxidos de ferro alterados (pontos milimétricos).
P65 - TOPO	10YR 4/4	argilo-siltosa	estrutura granular pequena	Fraca	Sem poros visíveis	Macia	Muito friável	Plástico, pegajoso	Solo acastanhado argiloso, possivelmente borra de café, com poucos fragmentos milimétricos bem alterado e pouco resistentes de filitos e de hematita. Concreções milimétricas de hematitas muito friáveis. Horizonte B.
P66	7.5YR 5/6	argilo-siltosa	estrutura granular média a grande	Fraca	Poros muito pequenos (<1mm de diâmetro)	Ligeiramente dura	Friável	Plástico, pegajoso	Saprolito de xisto escuro castanho-avermelhado. Possui associado um material friável castanho claro semelhante ao borra de café. Nele, observa-se fragmento milimétricos a centimétricos do xisto em questão moderadamente resistentes a compressão entre os dedos.

Palúvio02 (André - após P20)	7.5YR 5/3	areia franca (subanguloso)	Estrutura granular média a grande	Fraca	Sem poros visíveis	Solta	Solta	Não plástico, não pegajoso	Solo aluvial de depósito marginal (margem direita) abaixo de uma ponte que fica no primeiro vale depois do ponto 20. Apresenta composição arenosa e coloração acastanhada. Possui fragmentos de rochas e minerais abundantemente na fração milimétrica a centimétrica (hematititos, quartzos, hematitas, pedaços de gangas) com comportamentos subanguloso a subarredondado. Possui bem menos micas que o Palúvio 01. Proximidades da Estação Dom Bosco. Solo acastanhado escuro, possivelmente borra de café.
Ponto Estação Dom Bosco (após P19)	7.5YR 3/4	franco-argilo-siltosa	estrutura de blocos subangulares médios a grandes	Moderada	Sem poros visíveis	Ligeiramente dura	Friável	Plástico, pegajoso	Possui concreções minerais esféricas milimétricas de óxidos de ferro (pretas). Apresentava fragmentos de filito prateado no entorno do local de coleta do material.

---

**B - Tabela com resultados químicos referentes ao conteúdo amostrado (ICP-OES)**

Amostra	Identificação	As	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Sc	Sr	V	Zn	Be	Mn	Sb	Al	Fe	Ca	K	Mg	Na	Zr	P	S	Ti
	Interna	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Branco	branco	<LQ	4,71	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	339	<LQ	329,06	142,34	134,63	104,6	14,72	<LQ	<LQ	<LQ
BRP-1	BRP-1	<LQ	631,71	<LQ	<LQ	59,74	10,38	164,91	7,33	<LQ	18,73	27,46	545,42	419,63	144,69	0,63	1952,72	<LQ	69721,03	99756,33	56873,72	14100,13	23340,17	24157,14	298,43	2477,72	371,46	23126,47
GBW 07311	GBW 07311	182,5	285,34	48,45	2,46	8,02	38,5	81,36	78,68	6,31	13,66	6,8	30,9	47,09	364,56	28,34	2908,48	16,78	56321,73	30148,58	3633,4	29061,18	3606,12	3617,83	100,74	205,64	152,55	2278,55
P01	PQ21-1565	<LQ	234,26	<LQ	<LQ	<LQ	8,53	<LQ	3,3	<LQ	<LQ	1,39	6,86	25,05	12,42	0,19	539,44	<LQ	8339,77	27943,61	6698,61	3604,54	3565,56	347,78	35,13	39,42	<LQ	282,23
P02	PQ21-1566	29,32	317,62	<LQ	<LQ	9,84	62,92	18,95	11,5	<LQ	30,14	3,17	20,73	39,92	61,92	0,78	6568,93	<LQ	20957,19	320874,94	5906,37	2189,76	5072,14	366,8	41,33	502,6	156,86	3133,81
P05	PQ21-1567	<LQ	184,82	<LQ	<LQ	8,54	35,17	37,64	10,09	<LQ	<LQ	3,15	2,36	40,83	34,98	0,7	7828,3	<LQ	17685,28	355299,56	405,18	1614,44	1155,17	196,68	39,91	427,31	114,24	1208,65
P09 BASE	PQ21-1568	<LQ	130,05	<LQ	<LQ	9,91	39,29	<LQ	3,78	<LQ	30,97	4,33	12,59	66,82	7,56	0,03	2474,51	<LQ	11114,63	75460,4	97,08	4639,2	386,14	445,37	70,26	68,89	<LQ	1824,82
P09 TOPO	PQ21-1569	<LQ	170,29	<LQ	<LQ	22,09	70,91	8,51	6,06	<LQ	42,86	7,33	12,75	87,04	14,03	0,13	3266,23	<LQ	22720,02	159400,69	112,8	7074,97	598,09	495,61	86,39	134,09	68,26	2057,73
P10	PQ21-1570	28,99	762,24	<LQ	<LQ	26,32	36,57	51,57	17,34	<LQ	74,99	3,76	91,61	53,35	96,76	1,53	35444,18	<LQ	17460,71	278607,13	9747,28	2026,27	7054,27	276,24	41,39	885,87	104,74	1827,13
P11 BASE	PQ21-1571	<LQ	445,18	<LQ	<LQ	12,7	114,66	31,37	31,4	<LQ	79,56	16,23	26,44	130,8	21,21	1,15	468,44	<LQ	81637,02	32754,18	200,67	23686,4	2555,29	1298,92	162,82	131,15	<LQ	6469,43
P11 TOPO	PQ21-1572	30,43	306	<LQ	<LQ	22	118,32	46	25,03	<LQ	50,92	18,59	14	150	27	1	5.380	<LQ	80.684	87.888	265	14580,63	2271,41	691	146,5	283,68	74,68	6588,76
P11 ALUVIO (PA1)	PQ21-1573	<LQ	177,57	<LQ	<LQ	54,52	105	58,36	39,29	<LQ	123	6	19	94	48	1	4.403	<LQ	27.068	148059,47	1.299	7.711	857,27	500,61	76,71	233,89	<LQ	3888,17
P19	PQ21-1574	<LQ	263,39	<LQ	<LQ	5,9	167,62	<LQ	2,75	<LQ	54,67	15	108,04	80,01	10,85	0,21	62	<LQ	98.123	23258,54	281,03	37773,29	1314,16	5324,28	281,35	137,33	<LQ	4862,9
P20	PQ21-1575	<LQ	474,94	<LQ	<LQ	8,98	201,17	<LQ	4,29	<LQ	47,47	26	120,86	161,73	36,48	<LQ	336	<LQ	163.423	96942,98	98,78	46515,03	1744,72	4669,79	144,41	156,47	<LQ	5591,22
P30	PQ21-1576	<LQ	374,03	<LQ	<LQ	7,15	183,14	<LQ	3,94	<LQ	30,28	19	111,93	141,34	15,46	0,12	140	<LQ	111.488	73052,06	154,6	48128,45	2137,49	3675,38	135,13	166,04	<LQ	4351,09
P37	PQ21-1577	<LQ	1011,51	<LQ	<LQ	3,71	15,23	<LQ	1,59	<LQ	<LQ	3	94,26	25,62	17,07	0,92	872	<LQ	58.735	20651,3	12006,59	28212,16	6267,94	1067,71	104,61	51,02	45,69	1468,04
P44	PQ21-1578	<LQ	603,83	<LQ	<LQ	14,71	33,38	23,75	11,7	<LQ	54,13	6	56,37	36,73	75,68	1,54	38.827	<LQ	21.381	286105,41	1281,3	3713,42	1830	331,99	40,25	1131,88	66,08	1035,1
P45	PQ21-1579	<LQ	960,79	<LQ	<LQ	58,19	207,03	39,53	43,06	<LQ	61,63	46	9,44	355,35	16,51	2,92	1.847	<LQ	116.421	84537,44	423,07	36099,34	4974,98	1380,45	359,55	273,6	<LQ	21316,6
P46	PQ21-1580	<LQ	392,14	<LQ	<LQ	13,16	200,89	37,38	8,1	<LQ	41,09	19,35	98,78	178,87	36,83	0,74	976	<LQ	182.391	53805,73	777,49	9919,33	1237,06	901,07	333,15	295,41	69,8	11112,9
P47	PQ21-1581	25,96	193,83	<LQ	<LQ	10,19	106,62	56,34	2,25	<LQ	<LQ	20	4,59	129,66	82,52	1	4.959	35	44.825	480279,5	641,16	2902,25	2249,46	117,68	76,68	712,4	450,31	4592,91
P48	PQ21-1582	<LQ	536,77	<LQ	<LQ	95,35	32,26	203,89	396,41	<LQ	553,24	4	2,43	46,68	595,03	1,29	33.901	<LQ	24.471	188584,16	292,51	167,77	421,23	28,84	59,22	317,65	59,01	1349,7
P51	PQ21-1583	31,87	238,93	<LQ	<LQ	26,67	61,26	27,3	4,76	<LQ	<LQ	8	2,91	86,62	44,27	0,3	29.779	50,17	41.952	332684,94	354,02	1016,82	673,66	187,34	73,39	366,89	148,53	3081,29
P53	PQ21-1584	39,34	14,24	<LQ	<LQ	16,56	199,5	7,64	<LQ	<LQ	<LQ	23	4,2	341,48	30,56	<LQ	770	<LQ	120.639	415372,31	110,32	333,98	248	96,14	266,01	443,57	68,96	15332,55
P57	PQ21-1585	<LQ	336,16	<LQ	<LQ	30,54	166,8	33,42	57,52	<LQ	119,06	18	83,49	128	63	2	4.905	<LQ	108.498	108456,9	3266,59	28438,29	1572,97	2467,56	159,48	515,42	<LQ	5071,11
P62 BASE	PQ21-1586	23,19	318,81	<LQ	<LQ	13,88	146,53	17,86	14,19	<LQ	75,03	14,63	52,62	96,18	35,94	2,35	3.083	<LQ	90.596	92885,43	2085,37	28492,96	1695,71	1953,8	117,52	417,49	49,96	3804,66
P62 TOPO	PQ21-1587	61,01	301,38	<LQ	<LQ	53,17	144,39	83,64	29,47	<LQ	57,37	14,15	18,02	116,28	48,09	0,54	3.437	<LQ	69.566	92881,57	305,17	16246,21	1217,61	969,36	116,19	265,14	159,63	3803,26
P63	PQ21-1588	<LQ	248,78	<LQ	<LQ	26,99	259,32	20,2	5,64	<LQ	84,76	21,84	20,21	153,65	42,83	0,1	1.193	<LQ	123274,81	110128,64	455,71	21649,74	1220,63	1251,99	134,7	253,06	<LQ	5377,52
P64 BASE	PQ21-1589	<LQ	276,93	<LQ	<LQ	18,1	57,13	23,08	5,18	<LQ	41,36	8,89	82,84	57,19	25,48	0,91	3.022	<LQ	35.015	53593,78	517,7	13451,83	1052,2	868,81	82,12	586,84	<LQ	1735,26
P64 TOPO	PQ21-1590	23,93	307,8	<LQ	<LQ	37,01	142,93	116,79	24,23	<LQ	220,01	15	60,44	113,04	335,1	4,25	8.285	<LQ	78.567	106388,43	324,07	34222,24	3792,36	889,11	156,12	736,59	<LQ	4695,29
P65 BASE	PQ21-1591	<LQ	282,99	<LQ	<LQ	15,28	192,4	8,22	53,89	<LQ	50,7	20	71,06	102	26	2	2.238	<LQ	104.540	63301,69	4218,99	35095,7	1543,93	3964,2	129,96	137,03	<LQ	4520,77
P65 TOPO	PQ21-1592	<LQ	227,21	<LQ	<LQ	51,93	96	12,41	87,12	<LQ	233,33	13	51	101,78	63,96	0,88	8.539	<LQ	43.480	164846,58	358,21	13748,57	1040,26	1164,18	91,57	211,72	<LQ	2499,33
P66	PQ21-1593	44,5	189,92	<LQ	<LQ	76,89	217,73	230,98	37,65	<LQ	137,49	16	22,01	132,12	48,62	2,45	3.113	<LQ	103.470	148040,56	795,89	21700,82	1722,84	2540,22	140,52	1199,95	281,32	4401,73
ANDRE (PA2)	PQ21-1594	<LQ	237,18	<LQ	<LQ	29,48	80,74	23,72	7,27	<LQ	40,57	9	11,12	117,03	113,36	0,28	3.426	<LQ	20.225	292498,84	264,88	3331,9	448,08	329,87	141,03	377,41	<LQ	5931,26
ESTAÇÃO DOM BOSCO (PA3)	PQ21-1595	31,23	1604,49	<LQ	<LQ	47,6	103,12	73,65	153,23	<LQ	96,25	15	103,4	118,1	211,86	4,31	50.601	78	73.545	267851,47	244,56	24972,64	4715,1	1107,52	98,52	1108,73	202,52	4037,34
LQ		22,03	2,58	13,72	1,77	3	1,66	4,6	0,707	2	12,64	0	0,846	1,6	0,801	0,03	18	28,57	150	39,43	6,6	23,33	11,03	22,6	1,69	16,82	42,23	3,64

LQ = Limite de Quantificação

Equipamento: Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)

Solicitante: Ana Paula Chimini

Coordenador: Prof. Herminio Arias Nalini Jr.

Data: 10/11/2022

C - Tabela com resultados químicos referentes ao conteúdo amostrado (ICP-MS)

Amostra	Identificação	89 Y	93 Nb	139 La	140 Ce	141 Pr	143 Nd	147 Sm	151 Eu	157 Gd	159 Tb	163 Dy	165 Ho	166 Er	169 Tm	172 Yb	174 Yb	175 Lu	181 Ta	205 Tl	207 Pb	232 Th	238 U
	Interna	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
GBW07311A	MRC(solo)	37.6	25.1	27.2	56.1	6.43	23.71	5.86	0.57	5.71	01.03	6.62	1.34	4.13	655	4.49	4.45	0.66	05.03	2.59	590.94	22.00	8.74
GBW07311B	MRC(solo)	40.7	26.6	29.4	60.8	6.82	25.22	6.19	0.62	06.02	1.10	07.03	1.43	4.38	695	4.75	4.75	0.72	5.25	2.68	632.01	22.68	9.18
Média (VO)		39.2	25.9	28.3	58.4	6.62	24.47	06.02	0.59	5.86	01.07	6.83	1.39	4.26	0.67	4.62	4.60	0.69	5.14	2.63	611.48	22.34	8.96
VC		42.7	25.0	30.0	58.0	7.40	27.00	6.20	0.60	5.90	1.13	7.20	1.40	4.60	0.74	5.10	5.10	0.78	5.70	2.90	636.00	23.30	9.10
TR (%)		92	103	94	101	90	91	97	99	99	94	95	99	93	91	91	90	89	90	91	96	96	99
BRP-1A	MRC(basalto)	40.2	30.2	41.9	93.2	11.5	49.3	11.0	3.40	10.3	1.51	8.41	1.57	4.25	559	3.44	3.46	0.49	1.75	0.12	5.23	3.69	0.79
BRP-1B	MRC(basalto)	45.3	34.2	46.2	102.2	12.4	53.3	11.8	3.64	11.0	1.62	8.98	1.67	4.55	600	3.65	3.70	0.53	1.87	0.12	5.64	04.01	0.83
Média (VO)		42.7	32.2	44.0	97.7	12.0	51.3	11.4	3.52	10.6	1.57	8.70	1.62	4.40	579	3.55	3.58	0.51	1.81	0.12	5.43	3.85	0.81
VC		42.0	29.1	42.6	93.3	12.3	51.9	11.2	3.42	10.4	1.52	8.50	1.62	4.20	570	3.48	3.48	0.50	1.96		5.50	3.97	0.82
TR (%)		102	111	103	105	97	99	102	103	102	103	102	100	105	102	102	103	102	92		99	97	99
Branco		607	99	<0,0179	192	<0,0020	121	<0,0159	<0,0060	<0,0040	<0,0020	74	<0,0020	78	14	97	101	20	<0,0040	237	575	125	<0,0060
P01	PQ21 1565	2.54	573	3.57	6.91	817	3.28	0.74	205	679	101	573	103	301	45	305	312	50	76	53	2.41	800	279
P02	PQ21 1566	12.3	4.60	12.3	24.0	3.44	13.80	3.42	849	2.71	426	2.50	486	1.43	205	1.37	1.38	205	314	144	8.17	2.31	01.06
P05	PQ21 1567	10.2	2.14	3.8	12.3	1.21	5.15	1.32	366	1.35	235	1.55	344	01.08	169	1.17	1.16	187	169	748	3.19	2.14	01.01
P09 BASE	PQ21 1568	10.4	2.76	22.9	35.4	5.63	31.60	8.63	1.881	5.50	681	2.94	465	1.25	162	01.05	01.05	158	572	104	2.16	4.11	1.28
P09 TOPO	PQ21 1569	12.7	3.52	11.6	26.1	4.23	23.96	6.78	1.560	4.84	616	2.93	515	1.48	214	1.43	1.42	216	398	204	4.26	5.64	1.35
P10	PQ21 1570	25.9	2.62	12.4	25.2	03.05	12.37	2.73	789	03.07	481	03.06	666	02.04	288	1.85	1.84	290	209	191	7.64	2.27	2.57
P11 BASE	PQ21 1571	16.4	13.3	24.3	38.0	4.46	16.25	3.34	844	3.32	517	3.14	630	1.89	281	1.88	1.89	277	1.23	466	10.43	13.90	2.80
P11 TOPO	PQ21 1572	12.5	12.6	18.4	43.3	3.32	12.17	2.68	669	2.62	0.40	2.43	488	1.47	224	1.55	1.58	239	1.12	392	10.46	12.06	3.26
P11 ALUVIO (PA1)	PQ21 1573	10.5	5.45	36.4	106	7.30	27.11	5.38	1.184	4.70	533	2.43	413	1.14	160	01.06	01.07	161	569	137	6.51	6.59	1.84
P19	PQ21 1574	24.5	16.3	32.0	62.1	6.13	21.50	4.48	912	4.52	747	4.57	922	2.79	423	2.80	2.84	427	1.58	456	15.07	20.84	2.15
P20	PQ21 1575	17.3	14.7	12.6	23.5	1.89	5.92	1.19	398	1.76	385	2.99	652	1.93	288	1.91	1.95	297	1.42	869	39.73	21.20	1.90
P30	PQ21 1576	20.0	10.5	40.6	95.5	6.49	21.88	4.17	975	4.28	631	3.76	741	2.17	318	2.12	2.11	322	991	538	17.92	16.08	1.33
P37	PQ21 1577	8.49	06.03	50.8	122	8.87	29.92	4.71	832	04.02	438	1.96	326	887	119	782	796	116	708	617	14.16	17.77	02.05
P44	PQ21 1578	29.4	2.58	31.6	38.1	10.34	40.26	8.21	1.85	6.80	01.03	5.74	1.10	3.19	452	2.96	2.95	433	0.19	272	9.56	2.81	3.61
P45	PQ21 1579	33.4	43.6	59.5	104	15.30	55.38	9.38	02.02	8.53	01.02	5.25	01.09	3.31	457	2.98	03.02	479	2.51	251	3.39	7.48	2.21
P46	PQ21 1580	25.3	30.2	55.4	101	9.57	31.76	5.74	1.24	5.34	0.81	4.83	947	2.81	426	2.88	2.91	444	2.00	01.02	55.54	25.19	2.96
P47	PQ21 1581	14.8	7.26	5.47	30.8	1.35	5.47	1.55	0.42	1.73	0.30	02.01	441	1.41	229	1.58	1.60	251	500	136	19.39	4.19	4.62
P48	PQ21 1582	8.86	3.15	12.0	41.9	2.30	8.82	2.31	497	1.81	301	1.96	432	1.41	227	1.57	1.58	238	281	313	17.67	4.51	3.68
P51	PQ21 1583	5.54	6.13	4.48	59.2	1.33	05.06	1.34	332	1.27	187	1.15	229	716	118	833	837	130	477	387	38.53	6.35	3.55
P53	PQ21 1584	11.2	28.2	3.63	9.51	889	3.41	0.89	244	01.09	236	1.81	414	1.37	226	1.70	1.73	276	1.86	9	10.19	16.63	3.26
P57	PQ21 1585	29.4	13.2	51.6	101	9.63	35.21	6.91	1.59	6.42	922	5.18	996	2.83	399	2.58	2.57	379	1.27	484	15.97	15.29	4.16
P62 BASE	PQ21 1586	16.0	10.5	18.7	73.0	2.87	10.10	2.20	575	2.56	418	2.69	589	1.88	305	02.08	02.07	313	916	418	17.74	14.38	3.67
P62 TOPO	PQ21 1587	11.6	7.66	13.4	78.7	2.48	8.78	1.84	485	2.22	344	2.21	453	1.35	205	1.39	1.40	211	743	296	15.16	9.99	3.24
P63	PQ21 1588	8.72	12.7	18.4	77.7	2.77	8.47	1.57	388	1.81	267	1.71	359	1.16	186	1.38	1.39	225	1.20	402	18.08	15.50	2.20
P64 BASE	PQ21 1589	21.5	3.63	162	101	26.61	75.38	11.59	2.29	8.66	983	4.41	769	02.06	237	1.37	1.39	189	367	165	9.32	6.66	1.44
P64 TOPO	PQ21 1590	41.5	11.8	56.9	90.6	9.58	37.23	7.27	1.83	7.52	1.00	5.49	01.05	2.78	351	2.14	2.17	297	1.16	483	16.37	12.84	4.45
P65 BASE	PQ21 1591	11.4	7.98	10.1	69.0	2.16	7.72	1.76	0.47	1.96	0.31	02.05	438	1.35	220	1.57	1.57	246	807	456	18.49	12.69	1.53
P65 TOPO	PQ21 1592	17.1	4.96	31.9	96.0	07.05	26.49	5.51	1.26	4.98	713	3.96	723	1.94	264	1.66	1.66	236	463	186	11.07	10.50	1.49
P66	PQ21 1593	15.2	10.8	35.4	136	6.60	24.27	05.05	01.04	05.03	632	3.10	552	1.56	222	1.51	1.50	233	01.03	265	6.93	17.52	05.08
ANDRE (PA2)	PQ21 1594	10.0	6.70	37.3	101	7.97	28.79	5.55	604	4.19	460	02.03	0.36	01.06	152	01.01	01.03	161	536	281	44.80	15.68	1.86
ESTACÃO DOM BOSCO (PA3)	PQ21 1595	38.3	7.84	33.2	112	6.27	23.56	6.28	1.43	4.64	750	4.51	930	2.92	448	2.99	03.01	479	640	603	62.01	08.08	5.00

VC = Valor Certificado

Equipamento: Espectrômetro de massas com fonte de plasma acoplado indutivamente (ICP-MS)

*VO = Valor obtido (média)*

*MRC = Material de Referência Certificado (Solo)*

*TR (%) = Taxa de Recuperação*

**Marca: Agilent / Modelo: 7700x**

Solicitante: Ana Paula Chimini

Total de Amostras: 31

Data: 18/11/2021

Coordenador: Prof. Herminio Arias Nalini Jr.

Resp. técnica: Antonio Celso Torres/Adriana Tropia de Abreu/ Leonardo Brandão