WELTON PEREIRA DA ROCHA JUNIOR

GÊNESE E COMPOSIÇÃO DE SOLOS DE DIFERENTES FERTILIDADES DESENVOLVIDOS A PARTIR DE ITABIRITO EM MINAS GERAIS

LAVRAS – MG
2025

WELTON PEREIRA DA ROCHA JUNIOR

GÊNESE E COMPOSIÇÃO DE SOLOS DE DIFERENTES FERTILIDADES DESENVOLVIDOS A PARTIR DE ITABIRITO EM MINAS GERAIS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Doutorado em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra.

Orientador

Prof. Dr. Yuri Lopes Zinn

LAVRAS –MG
2025

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Rocha Junior, Welton Pereira da.
Gênese e composição de solos de diferentes fertilidades desenvolvidos a partir de itabirito em Minas Gerais / Welton Pereira da Rocha Junior. - 2025.
103 p. : il.

Orientador: Yuri Lopes Zinn

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Fertilidade do solo. 2. Micromorfologia do solo. 3. Gênese do solo. I. Zinn, Yuri Lopes . II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

WELTON PEREIRA DA ROCHA JUNIOR

GÊNESE E COMPOSIÇÃO DE SOLOS DE DIFERENTES FERTILIDADES DESENVOLVIDOS A PARTIR DE ITABIRITO EM MINAS GERAIS

GENESIS AND COMPOSITION OF SOILS WITH DIFFERENT FERTILITIES DEVELOPED FROM ITABIRITO IN MINAS GERAIS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Doutorado em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra.

APROVADO em 22 de Agosto de 2025 Yuri Lopes Zinn - UFLA
Joao Jose Granate Sa e Melo Marques - UFLA
Carlos Alberto Silva - UFLA
Alberto Vasconcellos Inda Junior - UFRGS
André Thomazini - UFSJ

Documento assinado digitalmente
YURI LOPES ZINN
Data: 19/11/2025 09:13:13-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador
Prof. Dr. Yuri Lopes Zinn

LAVRAS – MG

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, com profunda gratidão:

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo firme nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

Aos meus orientadores, em especial ao Prof. Dr. Yuri Zinn, pelos valiosos conselhos, críticas construtivas e pela contribuição decisiva tanto para a minha formação acadêmica quanto para o meu crescimento pessoal.

Aos amigos que estiveram presentes nos momentos marcantes, dentro e fora da universidade, oferecendo apoio, companheirismo e boas risadas — com vocês, a jornada foi muito mais leve e significativa.

À minha namorada, uma dádiva que a vida me concedeu no meio desse processo. Sua presença, apoio e carinho foram pilares essenciais nesta trajetória.

A todas as pessoas especiais que, de alguma forma, enriqueceram minha vida e deixaram marcas que levarei comigo ao longo da jornada.

Aos técnicos, laboratoristas, funcionários e colaboradores — suas contribuições, muitas vezes silenciosas, foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

No Brasil, o minério de ferro é tipicamente encontrado em rochas metassedimentares compostas essencialmente por quartzo e óxidos de ferro e, portanto, quase sempre se transformam em solos pedregosos, de textura grosseira e baixa fertilidade. No entanto, alguns solos florestais desenvolvidos a partir de itabiritos, um tipo de rocha metassedimentar, sob clima tropical úmido em Minas Gerais, Brasil, inesperadamente apresentam altos teores de cátions básicos, por razões pouco explicadas na literatura. Para investigar a gênese desses solos incomuns, foram amostradas três topossequências, cada uma composta por pedons do terço superior, médio e inferior, sob vegetação nativa. Análises completas de caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica foram realizadas nos solos e fragmentos de material de rocha subjacentes. Todos os solos eram ricos em fragmentos grosseiros (> 2 mm) e com teores de argila variando de 11 a 71 %, com alta ou muito alta densidade de partículas, devido aos altos teores totais de Fe_2O_3 (23-69 %), enquanto os teores de Al_2O_3 eram tipicamente <13 %. Embora sejam essencialmente ácidos, o Al trocável era nulo ou baixo, enquanto a disponibilidade de cátions básicos variava de baixa nos pedons do terço superior a alta ou muito alta nos pedons do terço inferior. Mesmo sendo compostos principalmente por quartzo e hematita, a maioria dos horizontes apresentava pequenas quantidades de carbonatos (provavelmente de Fe, Mg e Mn), enquanto todas as argilas apresentavam micas, vermiculitas, caulinita e óxidos de Fe/Al em proporções altamente variáveis. Algumas argilas também apresentavam pirofilita e estilpnomelano, um mineral raro semelhante à biotita, e apatita. A gênese desses solos mais férteis de itabirito pode ser atribuída a uma combinação de alguns fatores, sendo eles: 1) presença de minerais ricos em nutrientes (Mg, Ca) no material de origem; 2) argilas com vermiculita de alta capacidade de troca catiônica; 3) transporte de nutrientes solúveis e matéria orgânica para posições mais baixas na paisagem e
4) ciclagem e retenção eficientes de nutrientes sob florestas nativas. Os solos analisados apresentam um potencial ainda pouco explorado para sistemas de agricultura de baixa intensidade, em razão de sua fertilidade natural relativamente superior à das áreas adjacentes, embora haja elevada complexidade em seu manejo. Independentemente do uso futuro, seja para fins agrícolas ou para a conservação, estas áreas se configuram como espaços de elevado valor, sobretudo pela sua associação à vegetação remanescente de Mata Atlântica, mas também pela gênese desses solos incomuns.

Termos de indexação: Itabirito; fertilidade do solo; micromorfologia do solo; Serra da Piedade; Serra de Bom Sucesso, gênese do solo, mineralogia do solo.

ABSTRACT

In Brazil, iron ore deposits are commonly metasedimentary rocks rich in quartz and iron oxides, resulting in soils that are typically stony, coarse-textured, and of low fertility. However, some forest soils developed on itabirites (banded iron formations) under humid tropical conditions in Minas Gerais exhibit unexpectedly high levels of basic cations, a phenomenon that remains poorly explained in the literature. To elucidate the genesis of these anomalous soils, three toposequences (comprising upper, middle, and lower slope pedons) were sampled under native vegetation. Comprehensive physical, chemical, mineralogical, and micromorphological analyses were performed on both soils and fragments of the parent rock. The soils contained abundant coarse fragments (>2 mm) and had clay contents ranging from 11 to 71%, with high particle density due to elevated total Fe_2O_3 contents (23–69%), whereas Al_2O_3 levels were generally below 13%. Despite their inherently acidic reaction, exchangeable Al was absent or very low, and the availability of basic cations ranged from low (upper slopes) to high or very high (lower slopes). Quartz and hematite predominated in soils, but several horizons contained trace amounts of carbonates (likely Fe, Mg, and Mn), while all clay fractions included mixtures of micas, vermiculite, kaolinite, and Fe/Al oxides in variable proportions. Some samples also contained pyrophyllite, stilpnomelane (a rare biotite-like mineral), and apatite. The genesis of more fertile itabirite-derived soils appears to result from a combination of factors: 1) the presence of nutrient-bearing minerals (Mg, Ca) in the parent material; 2) clays with high cation exchange capacity, notably vermiculite; 3) downward transport of soluble nutrients and organic matter; and 4) efficient nutrient cycling and retention under forest cover. These soils have underexplored potential for low-intensity agriculture due to their relatively high natural fertility compared with adjacent soils. Regardless of use, their association with Atlantic Forest remnants and unique pedogenesis make them valuable for both agricultural and conservation purposes.

Index terms: Itabirite; soil fertility; soil micromorphology; Serra da Piedade; Serra de Bom Sucesso; soil genesis; soil mineralogy.

INDICADORES DE IMPACTO

Este trabalho aprofunda a compreensão sobre áreas de fertilidade natural incomum no Quadrilátero Ferrífero, que constituem regiões ainda pouco aprofundadas na literatura científica. Diferentemente da abordagem predominante na região, centrada na mineralogia voltada à exploração econômica de ferro e outros minérios, este estudo orienta-se para usos sustentáveis do solo, com aplicações tanto na agricultura quanto na conservação ambiental. Ao priorizar a análise pedológica, geoquímica e mineralógica de forma integrada, o presente trabalho buscou ampliar o conhecimento científico sobre solos desenvolvidos de itabiritos e suas implicações ecológicas e produtivas. Embora não tenha sido concebido sob a égide de diretrizes específicas de organismos internacionais, como a Organização das Nações Unidas (ONU) e suas agendas globais, incluindo os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), o estudo dialoga de maneira indireta e coerente com princípios amplamente defendidos por essas iniciativas. A promoção do uso racional dos recursos naturais, a valorização dos serviços ecossistêmicos e a busca por alternativas de manejo que conciliem conservação e produção refletem avanços científicos que convergem com o espírito das diretrizes da ONU, mesmo sem delas depender metodologicamente. Dessa forma, o trabalho mantém sua autonomia científica, pautando-se em fundamentos técnicos e metodológicos sólidos, com objetivos traçados a partir de hipóteses ainda não explicadas, sem abrir mão de reconhecer que a ciência do solo contemporânea desempenha papel estratégico no enfrentamento dos desafios socioambientais globais. Ao unir rigor científico, relevância prática e compromisso com a sustentabilidade, este estudo demonstra notável contribuição acadêmica, reforçando a importância de pesquisas locais com potencial de alcance global.

IMPACT INDICATORS

This study contributes to advancing scientific knowledge about areas that exhibit atypical natural fertility within the Iron Quadrangle still poorly investigated in the pedological and geochemical literature. In contrast to the prevailing research agenda, which has historically emphasized mineralogy and mining of iron and other ores, this work adopts an integrated perspective centered on sustainable land use and soil–landscape relationships. By combining pedological, geochemical, and mineralogical analyses, it broadens the understanding of soils developed from itabirites and elucidates the processes that sustain their fertility and ecological functioning. By documenting the occurrence of soils with distinct fertility in environments generally regarded as nutrient-poor, this research challenges conventional assumptions about the limitations of iron-rich landscapes. The results demonstrate the existence of pedoenvironments capable of sustaining vegetation with minimal anthropic input and with potential for low-intensity agricultural systems compatible with environmental conservation. Moreover, the study provides a scientific foundation for conservation strategies that value ecosystem services, carbon storage, and soil biodiversity in areas increasingly threatened by mining activities and urban expansion. Although not originally conceived within the framework of specific international guidelines—such as the Sustainable Development Goals (SDGs) promoted by the United Nations (UN)—the findings conceptually align with the global principles of sustainability, promoting the rational use of natural resources, recognizing soil ecosystem services, and developing management models that integrate production and conservation represent scientific advances consistent with the UN sustainability agenda. Through methodological rigor, local relevance, and global resonance, this work reinforces the strategic role of soil science in addressing contemporary socio-environmental challenges and highlights the importance of regionally based research for the sustainable management of tropical landscapes.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **10**

2 REFERENCIAL TEÓRICO **11**

2.1 Geologia do quadrilátero ferrífero **11**

2.2 Serras do Quadrilátero Ferrífero **13**

2.3 Solos do Quadrilátero Ferrífero **15**

2.4 Óxidos de Ferro **17**

2.5 Suscetibilidade Magnética **19**

3 MATERIAL E MÉTODOS **19**

3.1 Área de estudo **19**

3.2 Amostragem e classificação de solos **21**

3.3 Métodos analíticos **23**

3.3.1 Fertilidade do solo **23**

3.3.2 Granulometria **24**

3.3.3 Densidade de partículas **24**

3.3.4 Densidade do solo **25**

3.3.5 Carbono total do solo **25**

3.3.6 Nitrogênio total do solo, nitrato e amônio **26**

3.3.7 Espectroscopia de infravermelho **26**

3.3.8 Composição química total por fluorescência de raios-X **27**

3.3.9 Difração de raios-X **27**

3.3.10 Susceptibilidade magnética **28**

3.3.11 Análises Micromorfológicas **28**

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO **29**

4.1 Classificação, física e química dos solos **29**

4.2 Espectroscopia de Infravermelho **49**

4.3 Composição química total **52**

4.4 Mineralogia **56**

4.5 Susceptibilidade magnética **67**

4.6 Micromorfologia **70**

5 CONCLUSÃO **74**

6 REFERÊNCIAS **76**

APÊNDICES **84**

1 INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado no centro-sul de Minas Gerais, junto à borda do Craton do São Francisco, abrange cerca de 7.200 km² (Almeida, 1977). Seu nome decorre de seu formato aproximadamente quadrangular formado por serras com afloramentos de sedimentos do Supergrupo Minas, datados do Paleoproterozóico (Teixeira; Figueiredo, 1991). A região é notável pelas ocorrências de minerais, especialmente nos itabiritos, rochas metamórficas bandadas, tipicamente compostas por camadas ou faixas alternadas de óxidos de Fe – principalmente hematita e magnetita – com quartzo ou formas de sílica microcristalina, como cherts (Oliveira; Clemente; Vial, 1983), tornando-a estratégica para a mineração e desenvolvimento econômico regional.

A maioria dos minérios de Fe de qualidade comercial na área compreende o itabirito e outras formações rochosas de ferro bandadas. A maioria dessas rochas provavelmente se formou durante o Paleoproterozóico, ca. 2.500-2.000 Ma anos atrás (Uhlein; Noce, 2012), quando os oceanos e a atmosfera desenvolveram níveis de gás oxigênio altos o suficiente para precipitar o Fe^{2+} até então dissolvido na água em teores relativamente elevados. Após um tempo geológico tão longo, a maioria dessas formações sedimentares sofreu metamorfismo, o que aumentou sua densidade e resistência mecânica, enquanto movimentos tectônicos eventualmente as elevaram do fundo do mar que então ocupava Minas Gerais até à superfície.

O Quadrilátero Ferrífero também abriga muitos depósitos minerais valiosos (nomeadamente de Au, Mn e Al), que foram os primeiros a serem historicamente explorados no Brasil (Uhlein; Noce, 2012). Sua geologia é bem conhecida desde a década de 1940, mas mais recentemente e em um grau muito menor, seus solos também têm sido estudados, apesar

de serem cultivados para produzir alimentos e fibras para suas populações há bastante tempo. Nas encostas mais íngremes das cadeias de itabiritos, os solos são frequentemente

Nessolos Litólicos pouco desenvolvidos, pedregosos e rasos (Pereira, 2010; Schaefer *et al*., 2015), enquanto em terrenos mais planos, Latossolos profundos e altamente intemperizados podem se desenvolver (Costa, 2003). Muitos, ou talvez a maioria, desses solos apresentam quantidades consideráveis de cascalho e fragmentos mais grosseiros de itabirito e de outras rochas resistentes ao intemperismo, como quartzitos e micaxistos e, em alguns casos, também petroplintitas. Devido à natureza pobre em nutrientes de seu material de origem, esses solos também apresentam fertilidade natural inerentemente baixa a muito baixa (Carvalho-Filho *et al.*, 2011), especialmente em relação a cátions básicos (Figueiredo *et al.*, 2004).

Contudo, alguns estudos revelam ocorrências inesperadas de solos eutróficos formados

a partir de itabirito no Quadrilátero Ferrífero, com teores de bases trocáveis superiores às áreas vizinhas. Araujo *et al*. (2014) descrevem um solo situado em uma encosta sob floresta tropical com soma de bases > 50%, profundidade > 100 cm e capacidade de troca catiônica (CTC) total > 21 $cmol_c$ dm^{-3}. Uma pesquisa mais recente em outra área de itabirito encontrou fertilidade similarmente alta em pequenos fragmentos de solos ferruginosos colonizados por leguminosas fixadoras de N, e propôs que a entrada de N favoreceu altos teores de matéria orgânica do solo, marcados por baixas relações C:N (Baião *et al*., 2021).

A alta CTC e a elevada saturação por bases indicam um expressivo potencial para o uso agrícola sustentável em pequenas escalas. Essa condição requer a adoção de práticas conservacionistas, como a conservação do solo, a manutenção dos teores de matéria orgânica e a preservação da biodiversidade nativa. Embora a declividade e a pedregosidade possam limitar o uso, essas características também justificam sua designação como áreas de proteção ambiental, especialmente em função de sua associação com remanescentes de Mata Atlântica no Quadrilátero Ferrífero.

Dada a sua importância e o pouco conhecimento sobre estas áreas, este estudo objetivou explicar a gênese desses solos com fertilidade acima do comum, por meio da caracterização de três topossequências localizadas em duas diferentes formações de itabiritos, bem como estudar a matéria orgânica do solo e sua relação com a matriz mineral e fertilidade. As hipóteses testadas foram que a alta fertilidade do solo se deveu principalmente a uma composição química e mineralógica rica em nutrientes dos itabiritos, e que a posição na paisagem favorece o acúmulo de nutrientes em áreas tipicamente deposicionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geologia do quadrilátero ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero é uma grande estrutura geológica cujo formato se assemelha a um quadrado e abrange uma área de aproximadamente 7.000 km^2, que se estende entre as cidades de Ouro Preto a sudeste e Belo Horizonte, a noroeste. Seu embasamento e áreas circunvizinhas são compostos de gnaisses tonalítico-graníticos de idade Arqueana, i.e. 2.7 bilhões de anos (Roeser; Roeser, 2010).

O QF possui grande importância econômica regional e nacional, devido aos depósitos de minério de ferro, derivados de formações ferríferas bandadas, que são os maiores já encontrados no Brasil, parte expressiva das reservas mundiais e são a principal fonte para a indústria siderúrgica estadual. O Brasil detém 10 % (33 bilhões de toneladas) das reservas de minério de ferro mundiais (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2010). As reservas brasileiras, com teor médio de 52 % de Fe_2O_3, estão distribuídas entre o Quadrilátero Ferrífero (68 %); Carajás (16 %), no Estado do Pará, e Urucum (16 %) no Mato Grosso do Sul.

Geologicamente, a região é dividida em três unidades de rochas metassedimentares supracrustais: o Supergrupo Arqueano Rio das Velhas, o Supergrupo Proterozóico Minas e o Grupo Proterozóico Itacolomy. O Supergrupo Rio das Velhas, composto de metassedimentos vulcanoclásticos, químicos e pelíticos, encontra-se de forma discordante acima do embasamento. O Supergrupo Minas, que possui até 6 km de espessura, é composto principalmente de metassedimentos pelíticos e quartzosos. Dentre os seus quatro grupos, o Itabira é o mais significativo em termos econômicos, contendo os minérios de ferro, localmente denominados itabiritos, internacionalmente conhecidos como Banded Iron Formations (BIF's) do tipo Lake Superior. O grupo Itacolomy é basicamente composto de quartzitos (Roeser; Roeser, 2010).

A configuração estrutural atual resulta da sobreposição de dois eventos tectônicos principais (Chemale Jr. *et al.*, 1994). O primeiro corresponde à nucleação de sinclinais regionais nas rochas supracrustais e ao soerguimento de domos granito-gnáissicos durante a Orogênese Transamazônica (2,1–2,0 Ga). O segundo, associado a um cinturão de cavalgamentos para oeste de idade Pan-Africana/Brasiliana (800–600 Ma), promoveu a inversão, amplificação, translação e rotação dos sinclinais em torno das estruturas dômicas.

O itabirito é uma rocha metassedimentar, cujos principais componentes minerais são o quartzo e os óxidos de ferro, hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4). Essa rocha apresenta uma estrutura que varia de foliada a maciça e com textura de granoblástica a lepidoblástica. Sua mineralogia pode incluir como acessórios carbonatos, piroxênios, granada, anfibólios e outros. Sua gênese implica que grandes quantidades de ferro estivessem em solução como espécies reduzidas de ferro que foram oxidadas e precipitadas como óxidos de ferro. Embora esta teoria seja amplamente aceita, ainda existem questões não totalmente explicadas, como a origem dos metais, a quantidade de oxigênio necessária na atmosfera e nos oceanos para oxidação do Fe, e a vasta extensão e regularidade das bandas formadas, especialmente as do tipo Lake Superior (Pirajano, 2009).

A sequência de itabiritos no QF é relativamente monótona, sendo hematita o óxido

predominante em diferentes formas (martita, hematita granoblástica e especularita) e o quartzo, além de dolomita e anfibólios (grunerita, tremolita, actinolita, cummingtonita e antofilita) que permitem a definição dos três tipos composicionais principais: quartzo- itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico (Rosière *et al*., 2001).

A forma mais comum encontrada é o quartzo-itabirito, que corresponde a jaspilitos (jaspe, i.e., quartzo e minerais de ferro) metamórficos apresentando alternância de níveis claros (silicosos) e escuros (ricos em óxidos de ferro) de espessura milimétrica a centimétrica (Trendall, 1973, 1983). Itabiritos dolomíticos são constituídos de bandas de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), quartzo e óxidos de ferro que podem ainda apresentar calcita, clorita e anfibólios. Itabiritos anfibolíticos apresentam sempre anfibólios de composição variada como cristais bem a mal formados, sem orientação ou constituindo uma trama nematoblástica de cristais orientados segundo o bandamento e xistosidade (Rosière; Chemale Jr., 2000).

Além dos itabiritos, há outros tipos de formações ferríferas que podem ser reconhecidos no QF: hematita-filitos, Fe-dolomitos e, subordinadamente, filitos piritosos. Outros silicatos que não o quartzo ocorre como acessórios mais raramente, tais como sericita, clorita, muscovita, além de cianita, talco, pirofilita, granada, estaurolita, biotita, apatita, caulinita, cloritóide, fuchsita, flogopita, crisotila, stilpnomelano, titanita e apatita (Rosière, 1981).

2.2 Serras do Quadrilátero Ferrífero

As feições mais conhecidas da geomorfologia da QF são as serras e cristas quartzíticas e itabiríticas, onde se concentram as reservas de ferro e outros metais. Neste trabalho, as amostragens foram conduzidas em duas serras. A Serra de Bom Sucesso está localizada principalmente no município de mesmo nome, a aproximadamente 200 km a sudoeste de Belo Horizonte, compondo a parte do extremo sul do QF. É uma estreita faixa de 500 a 1.000 metros de largura e 30 quilômetros de extensão, onde aflora uma sequência metassedimentar, metamorfisada em fácies anfibolito, constituída por quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita (Quéméneur *et al*., 2003).

No contexto geomorfológico, o relevo é montanhoso, sendo a Serra de Bom Sucesso proeminente na topografia circunvizinha: o desnível médio entre a crista da serra e o restante do relevo, constituído por morros de forma arredondada é de até 400 m. A serra forma uma extensa e alongada crista com direção NE, suportada por rochas metassedimentares, formação ferrífera e quartzitos, com cotas máximas variando entre 1.110 a 1.250 m. Os picos são resistentes à erosão pela presença de itabiritos ou quartzitos (Mineração; Metálicos S.A, 2009).

Segundo Quéméneur *et al*. (2003), são reconhecidos três níveis estratigráficos, da base para o topo: i) xisto e quartzito; ii) itabirito; iii) xisto e quartzito. A camada de itabirito apresenta dois espessamentos importantes. O primeiro ao norte onde a camada alcança cerca de 250 m e outro no centro, ao norte do corte do Rio Pirapetinga, atingindo 300 m. No resto da serra a espessura do itabirito não passa de 40 m (Quéméneur *et al*., 2003).

A segunda localidade amostrada é a Serra da Piedade, na divisa dos Municípios de Sabará e Caeté, sendo um importante sítio geológico associado a história da exploração do interior do Brasil pelos bandeirantes. É sustentada morfologicamente por rochas do supergrupo Minas, Grupo Itabira, das formações Cauê, constituída por itabiritos, e Cercadinho, constituída por filitos, sendo a parte superior recoberta por uma superfície de canga que ajuda a preservar o relevo (Azevedo *et al*., 2008).

De modo geral, o relevo da Serra da Piedade é caracterizado por possuir orientação estrutural SW-NE e altitudes que variam entre 950 e 1.736 m. Além disso, esta serra se destaca por possuir vertentes abruptas, que apresentam alta declividade e expõem a rocha. Assim, como nas demais serras que compõem o QF, as características do relevo da Serra da Piedade também foram condicionadas pelo controle litoestrutural (Pereira, 2012).

A geologia da Serra da Piedade pode ser resumida em: canga (crosta ferruginosa); Formação Sabará (Grupo Sabará); Formação Cercadinho (Grupo Piracicaba); Formação Cauê (Grupo Itabira); Formação Moeda (Grupo Caraça); Grupo Nova Lima; rochas graníticas, gnáissicas e pegmatíticas; e diques metabásicos. As rochas graníticas e gnáissicas, ocupam os patamares altimétricos mais rebaixados, tanto da vertente norte como da sul, na área em estudo. Os xistos e filitos do Grupo Nova Lima ocupam as porções intermediárias da vertente sul e contrastam com os itabiritos da Formação Cauê. Estes últimos, por serem mais resistentes aos processos intempéricos, ocupam os patamares altimétricos mais elevados. Já a vertente norte apresenta tanto o itabirito, nas porções elevadas, como os xistos e filitos das Formações Cercadinho e Sabará, nas porções intermediárias (Pereira, 2012).

Em termos de vegetação, assim como em diversas outras serras do QF, o porte arbóreo está associado à forma do terreno e ao substrato litológico. No sopé, tem-se a mata mais fechada de encosta e no topo constata-se uma vegetação rasteira de menor porte, onde, em diversos trechos da paisagem são visíveis manchas desprovidas de vegetação que são ou foram destinadas às atividades de extração mineral (Pereira, 2012).

2.3 Solos do Quadrilátero Ferrífero

O QF é uma região de grande diversidade ambiental, apesar da forte aptidão à exploração mineral, que exerce grande domínio sobre as atividades da região. Em consequência, a maioria dos estudos científicos sobre o QF estão relacionados a este propósito, o que acaba por negligenciar estudos focados em solos.

A acumulação de óxidos de ferro nos solos do QF depende de diversos fatores, principalmente, do material de origem e do estágio de intemperismo e pedogênese (Carvalho Filho *et al.*, 2015). A acumulação é tanto maior quanto mais rica for a rocha em minerais ferromagnesianos ou óxidos de Fe. Também poderá ser tanto mais elevada quanto maior for o intemperismo e quanto maior for a quantidade de minerais primários alterados.

Os levantamentos de solos locais mostram que os teores de Fe_2O_3 nos solos podem ser bastante variáveis, alcançando teores > 60 % (Ker; Schaefer, 1995), distribuídos uniformemente ou em concentrações localizadas (i.e. plintitas, lateritas).

Coelho *et al*. (2017) caracterizaram os principais solos dentro do QF, com destaque para os Cambissolos, relacionados a rochas metassedimentares e a relevo acidentado, dominantes em Sabará, independentemente da vegetação nativa, composta de floresta estacional semidecidual e campo cerrado, que ocorrem lado a lado. São solos de baixa fertilidade natural, geralmente álicos, epipedregosos quando sob campo cerrado, com elevados teores de silte, muitas vezes superiores aos de argila, de textura média, quando sob campo cerrado, ou argilosa, quando sob floresta. Foi sob floresta que se observou o solo não ferruginoso mais peculiar e evoluído dentro os estudados em Sabará: um Latossolo com maior conteúdo de Al trocável dentre todos os perfis estudados (4,4 $cmol_c$ Kg^{-1}).

Em Nova Lima, os Plintossolos, originados do intemperismo das cangas lateríticas, possuem grande quantidade de cascalhos e calhaus de petroplintita no perfil. No entanto, seus atributos variam significativamente na paisagem, mesmo a curtas distâncias, o que, associado às variações do relevo local, revelam diferentes fitofisionomias e microhabitats para a fauna e flora locais. Em Brumadinho, no entanto, sob floresta estacional semidecidual e relacionados ao intemperismo do granito, é que estão os solos não ferruginosos mais evoluídos, Latossolos, que se localizam no terço superior da única vertente estudada na região (Coelho *et al*., 2017).

Carvalho Filho, Curi e Shinzato (2010), em um vasto estudo referente à Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH, com 1.625 km^2) observaram a marcante influência do material de origem nas características dos solos da área, em que predominam solos pouco evoluídos (Cambissolos e Neossolos Litólicos), e em que se destaca o conjunto de solos de constituição ferruginosa, em geral de caráter perférrico, relacionados a três materiais de origem principais: itabiritos, dolomitos ferruginosos

e rochas básico-ultrabásicas. Os solos relacionados aos dolomitos ferruginosos, da Formação Gandarela, na maioria das vezes, apresentam também conteúdos muito elevados de óxidos de manganês, aos quais estão associadas cores muito escurecidas.

Apesar do forte contraste entre as formações vegetais da região, cuja transição é nitidamente marcada, não se observa correlação direta com as classes de solos, sua profundidade efetiva ou disponibilidade de nutrientes. Um exemplo de fator que molda a paisagem do Cerrado é o fogo periódico, o qual estabelece uma relação de equilíbrio ecológico determinante para sua composição florística (Alves; Silva, 2011). A deficiência em bases trocáveis é generalizada, exceto nos solos ferruginosos, havendo tendência de teores mais elevados de Al^{3+} trocável sob floresta, em função dos maiores teores de matéria orgânica (Carvalho Filho; Curi; Shinzato, 2010). Entretanto, estudos recentes indicam a ocorrência de solos inesperadamente mais férteis na região.

Na Serra de Bom Sucesso, localizada no extremo sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, Araujo *et al*. (2014) descreveram Argissolos originados de itabirito com alta capacidade de troca catiônica CTC, (21,4 $cmol_c$ kg^{-1}), saturação por bases (> 80 %) e alto teor de carbono orgânico do solo (3,89 dag kg^{-1}), que se distinguem dos solos formados por outros materiais de origem em áreas próximas, marcados justamente pela baixa fertilidade natural.

No Parque Estadual da Serra do Rola-Moça, na região do QF, Baião *et al*. (2021) descreveram pequenas áreas de campo rupestre sobre afloramentos ricos em ferro que apresentavam alta fertilidade do solo, evidenciada pela alta CTC, altos teores de matéria orgânica do solo, substâncias húmicas e nitrogênio, principalmente, por uma baixa relação C:N. Essa alta fertilidade natural de alguns desses solos desafia a suposição tradicional de que os solos dessa região e material de origem são pobres em nutrientes (Baião *et al*., 2021).

2.4 Óxidos de Ferro

Embora a caulinita seja em muito dos casos o principal mineral de argila dos solos brasileiros, os óxidos de ferro e alumínio têm grande importância na sua constituição e em propriedades como cor, estrutura e reações de troca iônica dos solos. Em adição a seus efeitos nas propriedades físicas e químicas dos solos, os óxidos de ferro e alumínio são indicadores de ambientes e processos pedogenéticos (Fitzpatrick; Schwertmann, 1982; Schwertmann; Kämpf, 1985).

A cor é um dos principais atributos para caracterizar e diferenciar solos, inclusive no Brasil, principalmente por sua fácil e direta visualização. Esta propriedade é de descrição formal

obrigatória em estudos pedológicos, sendo comum a utilização de termos referentes a cores em vários sistemas de classificação de solos (Barrón; Mello; Torrent, 2000). No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al*., 2018), a cor exerce papel fundamental na subdivisão dos Latossolos e de outras ordens de solos. Nos sistemas de classificação de solos da WRB (2022) e do USDA (United States Department of Agriculture, USDA, 2002), são usadas as denominações Rhodic e Xanthic diferenciar os solos de acordo com a cor vermelha forte ou amarela de solos ricos em óxidos de Fe.

De fato, a cor é utilizada para caracterizar e diferenciar solos, onde as cores vermelhas e amarelas resultam da presença de hematita e goethita na fração argila, respectivamente (Correa *et al*., 2008). A cor vermelha ou amarela dos perfis de solos é resultado da presença, tipo, tamanho e cristalinidade de óxidos de ferro, exceto na parte mais superficial, onde a cor pode ser brunada pelo efeito da matéria orgânica (Bigham; Ciolkosz, 1993; Cornell; Schwertmann, 1996).

Além da cor, os óxidos de Fe, principalmente hematita, goethita e ferrihidrita, estão intimamente relacionados com agregação e cimentação dos solos, podendo conferir-lhes características como maior permeabilidade e maior resistência à erosão. Podem, ainda, estar vinculados a outras propriedades dos solos, como capacidade de troca catiônica e aniônica (CTC e CTA), fixação de P e de metais pesados, e retenção de MOS (Correa *et al*., 2008).

A distribuição da hematita (Hm) e goethita (Gt) nos solos tropicais úmidos é bastante variável. Os principais fatores que favorecem a formação de Gt em detrimento a Hm no solo e, portanto, que concorrem para aumentar a relação Gt/(Gt + Hm), são: menores teores de ferro no material de origem; menores temperaturas; maior umidade e teor de matéria orgânica, e valores de pH mais baixos (Kämpf; Schwertmann, 1983; Schwertmann; Kämpf, 1985; Schwertmann; Taylor, 1989). A Hm e Gt apresentam características distintas, como nível de substituição isomórfica de Fe por Al na estrutura, grau de cristalinidade, tamanho e forma, dependendo do material de origem, estádio de intemperismo, condições climáticas e biológicas.

Os óxidos de Fe possuem cores fortes e densidade alta. Ocorrem em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, em proporções acessórias ou, se muito concentrados, formando minérios. A hematita (Fe_2O_3) apresenta densidade de 5,26 g cm^{-3} e é propriamente um óxido, assim como a magnetita (Fe_3O_4) de densidade 5,18 g cm^{-3}, enquanto a goethita (FeOOH) de densidade 4,27 g cm^{-3}, é um oxihidróxido (Miranda, 2002; Klein, 2001) ou sesquióxido.

A hematita é o principal mineral de minério de ferro. Seu nome originou-se do grego. *Hemos* significa sangue, em referência à cor vermelha do traço ou pó do mineral. Ela pode ocorrer sob diferentes formas: compacta, especular (laminar), porosa e ainda martita e hematita

granoblástica. A cela unitária é hexagonal, com parâmetros de rede a = b = 0,5038 nm e c = 1,3772 nm, com seis fórmulas mínimas por cela unitária. Seu arranjo dos cátions produz pares de octaedros de $Fe(O)_6$, no qual cada um compartilhando suas arestas com três octaedros vizinhos, no mesmo plano, e uma com um octaedro, em um plano adjacente (Klein, 2001).

A magnetita é um mineral magnético formado por óxidos de Fe II e III (Fe_3O_4 ou Fe_2O_3). Ela apresenta na sua composição, aproximadamente, 69 % de Fe_2O_3 e 31 % de FeO, resultando em 72,4 % de Fe e 27,6 % de oxigênio. O mineral apresenta forma cristalina isométrica, geralmente na forma octaédrica ou fibrosa. É um material de dureza 6,0, quebradiço, fortemente magnético, de cor preta e de brilho metálico (Klein, 2001). A magnetita é um mineral do grupo dos espinélios, que cristalizam no sistema cúbico (Lima, 1999).

Por intemperismo físico e oxidação, a magnetita transforma-se em hematita e maghemita (γ-Fe_2O_3), sendo comum sua ocorrência na fração argila dos solos (Fontes; Weed, 1991). Em alguns casos, a maghemita pode compreender até 40% da fração de óxido de ferro (Costa *et al*., 1999). Esse mineral apresenta estrutura cristalina semelhante à da magnetita, sendo um polimorfo da hematita.

A goethita pode ocorrer em vários tons de amarelo, marrom, de marrom amarelado até marrom escuro, a depender especialmente do tamanho do cristalito (Bigham; Ciolkosz, 1993). É opaca e tem brilho metálico. Este mineral comumente aparece sob a forma de um agregado cristalino fibroso ou radial. É muito dificilmente riscado pelo estilete, o que corresponde a uma dureza entre 5,0 e 5,5. Tem clivagem perfeita e fratura desigual, é quebradiço. A goethita tem um aspecto estriado e áspero, ocorre em ambientes oxidantes, como produto de alteração de minerais portadores de ferro. Forma os "chapéus de ferro" como produto de alteração superficial de veios mineralizados com metais. É um constituinte importante das chamadas lateritas ou petroplintitas. Consiste de Fe em coordenação VI com oxigênio e (OH)-, formando octaedros de $FeO_3(OH)_3$.

A presença e proporção dos diferentes óxidos de ferro nos solos (como hematita, goethita, magnetita e maghemita) não afetam apenas a cor, mas também exercem influência significativa sobre o comportamento magnético dos perfis. Nesse contexto, a suscetibilidade magnética (SM) é uma propriedade do solo que reflete parte da sua composição mineralógica (Souza Júnior *et al*., 2010), e que, portanto, pode ser utilizada como método complementar para estimar atributos dos solos, como cor, teor de argila e o teor de hematita (Siqueira; Marques Júnior; Pereira, 2010). Pode, portanto, representar uma importante prática em estudos do solo, uma vez que é uma técnica barata, segura, simples e rápida para determinar a presença e o teor de óxidos de Fe ferrimagnéticos nos solos e sedimentos.

Alguns solos apresentam magnetização espontânea em razão da presença de minerais ferrimagnéticos, como a magnetita (Fe_3O_4), concentrada nas frações areia e silte, e a maghemita (γ-Fe_2O_3), predominante na fração argila (Kämpf; Curi, 2000). A magnetita é geralmente herdada do material de origem, enquanto a maghemita resulta da oxidação da magnetita (Barrón; Torrent, 2002). Além disso, Viana *et al*. (2006) demonstraram, em condições laboratoriais, que a magnetita pode se formar por termorredução da hematita, mesmo na ausência prévia de magnetita, em solos do Cerrado submetidos ao regime periódico de queimadas da cobertura vegetal.

Os valores de SM por unidade de massa (χBF) são proporcionais à concentração de minerais ferrimagnéticos na amostra e têm sido utilizados em diversos estudos (Dearing, 1994), pois seus valores são altamente sensíveis e podem detectar a presença desses minerais em níveis de detecção bem abaixo daqueles encontrados pela difração de raios-X (DRX) e pela espectroscopia Mössbauer (Maher, 1986). Resende *et al*. (1988) sugerem a utilização da χBF como critério de classificação de solos em virtude de sua simplicidade de determinação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

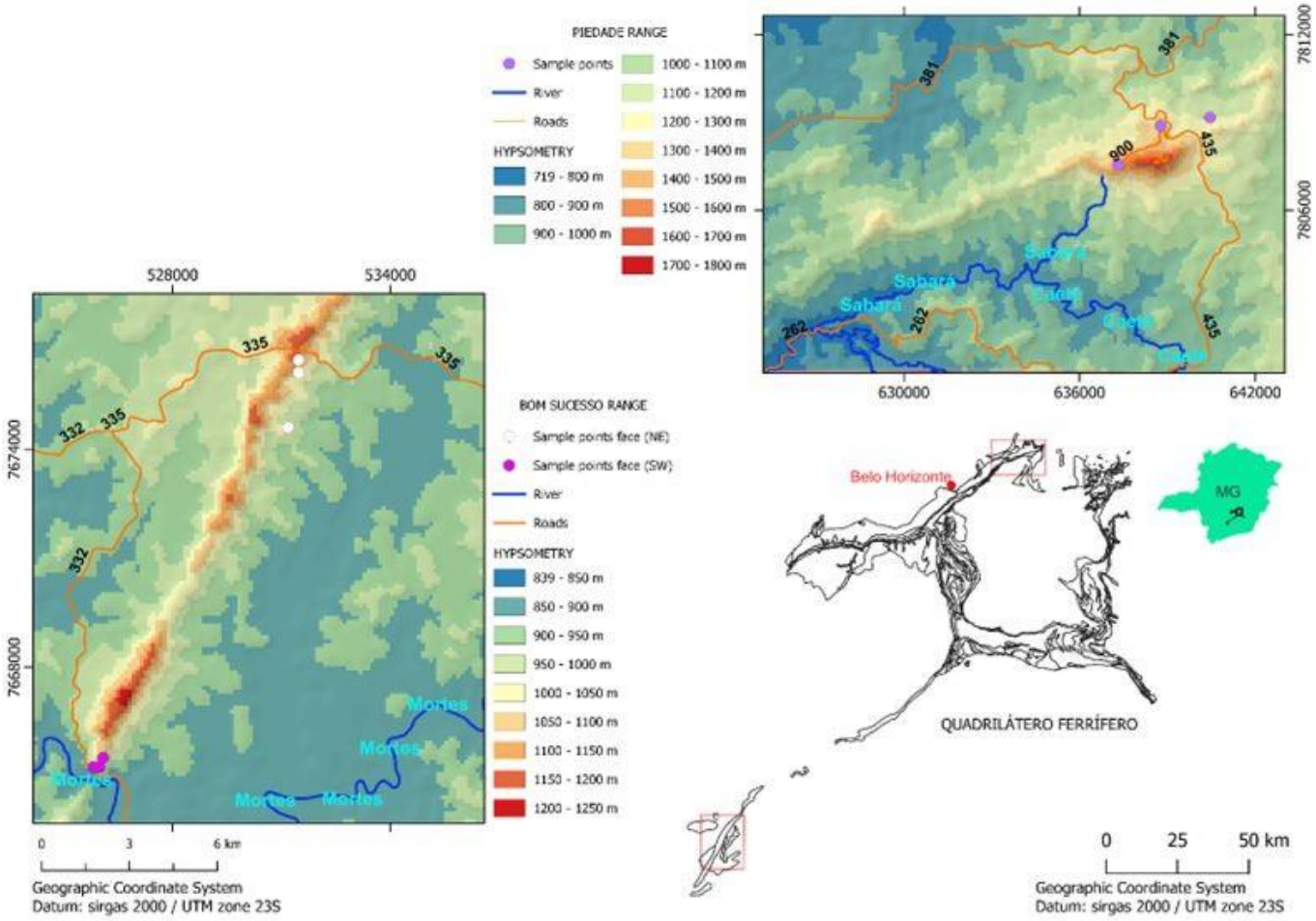
3.1 Área de estudo

Este estudo abrangeu duas serras no Quadrilátero Ferrífero (QF).

A Serra de Bom Sucesso, localizada a 200 km a sudoeste de Belo Horizonte, compõe o extremo sul das formações ferríferas do QF, caracterizando-se por uma faixa estreita (500-1.000 m de largura e 30 km de extensão) de metassedimentos metamorfisados em fácies anfibolito, compostos por quartzitos, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em

magnetita (Quéméneur *et al*., 2003). Já a Serra da Piedade, situada entre Sabará e Caeté, a 50 km a nordeste de Belo Horizonte, é sustentada por rochas do Supergrupo Minas, incluindo itabiritos da Formação Cauê e filitos da Formação Cercadinho (Renger *et al.*, 1994) (Figura 1).

A temperatura média anual (MAT) e a precipitação (MAP) em Lavras, a cerca de 40 km da Serra do Bom Sucesso e a uma altitude de 919 m, é de 22,9 ºC e 1.461 mm (Oliveira; Assis; Ferreira, 2018). No centro de Caeté, a cerca de 5 km da Serra da Piedade e a uma altitude de 840 m, a MAP é de 1.491 mm e a MAT é de 20 ºC (16 ºC no topo da Serra da Piedade) (Nery, 2016; Vianello; Maia, 1986).



Fonte: Autor

Figura 1: Localização geográfica e hipsometria das áreas estudadas do Quadrilátero Ferrífero.

3.2 Amostragem e classificação de solos

Em cada serra de itabirito, foram amostradas topossequências com a máxima amplitude altitudinal viável, mas incluindo sempre o terço superior, médio e inferior, desde que todos os locais mostrassem claramente a ocorrência de itabiritos como rocha contínua, matacões ou fragmentos como evidência visível de seu papel como material parental do solo (Tabela 1). As áreas de amostragem específicas em cada topossequência foram selecionadas também com base no acesso a esses locais, que muitas vezes era difícil devido à falta de estradas, declives elevados e cobertura florestal espessa ou restrições em propriedades privadas e áreas protegidas.

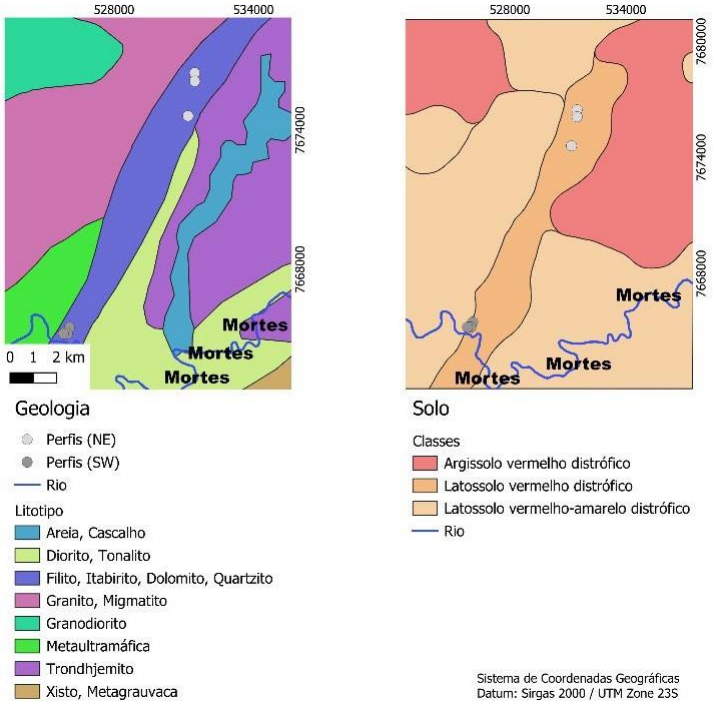
Tabela 1: Informações geográficas dos perfis.

PERFIL	LOCAL	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (m)	DECLIVE (%)
P1	Bom Sucesso (NE)	-21º 0’ 44’’	-44º 41’ 49’’	1170	75
P2	Bom Sucesso (NE)	-21º 0’ 51’’	-44º 41’ 49’’	1097	36
P3	Bom Sucesso (NE)	-21º 1’ 4’’	-44º 41’ 59’’	1034	27
P4	Bom Sucesso (SW)	-21º 6’ 41’’	-44º 44’ 55’’	960	58
P5	Bom Sucesso (SW)	-21º 6’ 49’’	-44º 44’ 59’’	940	49
P6	Bom Sucesso (SW)	-21º 6’ 49’’	-44º 45’ 5’’	890	21
P7	Piedade	-19º 49’ 26’’	-43º 41’ 19’’	1511	53
P8	Piedade	-19º 48’ 39’’	-43º 40’ 30’’	1345	21
P9	Piedade	-19º 48’ 29’’	-43º 39’ 32’’	1189	21

Obs.: (NE) = Porção Nordeste da serra; (SW) = Porção Sudoeste da serra.

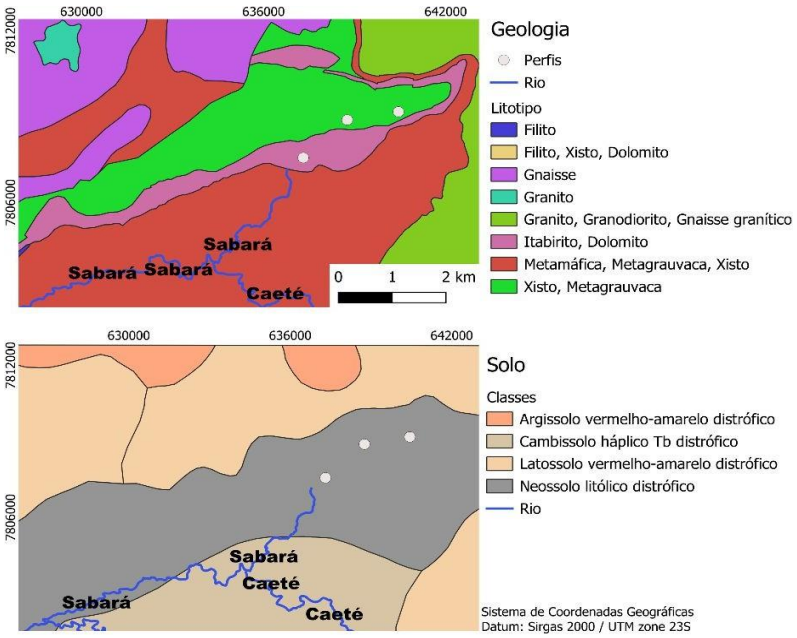
Fonte: Autor

Para determinar os locais de coleta e abertura das trincheiras, utilizaram-se imagens do Google Earth de alta resolução e mapas geológicos e pedológicos do IDE/MG (Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema – IDE, 2024; Figuras 2 e 3). Esses dados permitiram identificar padrões e amostrar nove perfis de solos em três topossequências representativas das Serras de Bom Sucesso (faces nordeste e sudoeste) e da Piedade.



Fonte: Autor

Figura 2: Geologia e solos da região de Bom Sucesso, adaptado dos mapas geológicos e de solos do Sistema de Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais.



Fonte: Autor

Figura 3: Geologia e solos da região da Piedade, adaptado dos mapas geológicos e de solos do Sistema de Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais.

Todos os locais florestais eram ricos em árvores leguminosas, como o angico (*Anadenanthera sp.* e *Piptadenia sp.*) fixadoras de N e, em menor grau, na árvore pioneira *Cecropia sp.*, sugerindo que essas áreas são regenerações florestais secundárias avançadas. Em cada local, um perfil de pelo menos 1 m de profundidade ou alcançando o leito rochoso foi escavado e o perfil de solo foi descrito morfologicamente de acordo com Santos *et al.* (2013). Amostras de solo foram coletadas de cada horizonte pedogenético junto com fragmentos do material de origem.

A cor foi determinada em condições de campo utilizando a caderneta de cores de Munsell (1994) e os perfis foram classificadas segundo os padrões de Santos *et al.* (2013) e Santos *et al*. (2018), até o terceiro nível categórico. Cada pedon ainda foi correlacionado para o nível categórico de Grande Grupo na Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022).

3.3 Métodos analíticos

Os solos coletados foram destorroados, secos ao ar e passados em peneira de 5 mm para separação do material mais grosseiro (cascalho) e, em seguida, em peneira de 2 mm para terra fina seca ao ar (TFSA). Os fragmentos de rocha coletados foram acondicionados individualmente em panos de algodão, quebrados com martelo e passados em peneira de 2 mm, onde todo material processado foi guardado em sacos plásticos e identificado.

3.3.1 Fertilidade do solo

As amostras de TFSA foram encaminhadas para o laboratório de fertilidade do solo da Universidade Federal de Lavras, onde foram realizadas as análises químicas segundo métodos compilados por (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuá - Embrapa, 1997). O pH foi mensurado em H_2O e KCl 1 mol L^{-1} , na proporção solo-líquido de 1:2,5 (v/v). Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1}, sendo Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica e Al por titulação com NaOH 0,025 mol L^{-1}; K e P foram extraídos com solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,025 mol L^{-1}), sendo o K determinado em fotômetro de chama e P por colorimetria; H+Al foi determinado indiretamente por leitura em potenciômetro em solução SMP tamponada a pH 7,0 (Quaggio; Van Raij, 2001). O P remanescente foi mensurado na solução de equilíbrio de $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1}, contendo 60 mg L^{-1} de P, com leitura por colorimetria a 725 nm. O C orgânico do solo foi determinado por

oxidação úmida com Na_2CrO_4 4mol L^{-1} + H_2SO_4 concentrado, sem aquecimento externo, e leitura colorimétrica do excesso de Cr^{3+} em solução, conforme Cantarella, Quaggio e Raij (2001). Com os resultados obtidos, calcularam-se os valores de saturação por Al (m%), a CTC a pH 7,0 (valor T), a CTC efetiva (valor t), a soma de bases (SB) e a saturação por bases (V%).

3.3.2 Granulometria

A granulometria dos solos foi determinada após dispersão com solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} e agitação por 16 h, de acordo com o método da pipeta descrito por Embrapa (2011). Após a agitação, as amostras foram passadas em peneira de malha de 0,053 mm, sendo a fração retida (areia) lavada, transferida para béquer, seca em estufa a 100 °C por 12 h e, posteriormente, pesada. A suspensão remanescente foi deixada em repouso pelo tempo calculado segundo a Lei de Stokes, considerando a densidade das partículas do solo, previamente determinada, e a temperatura da suspensão. Em seguida, coletou-se, com pipeta, uma alíquota a 5 cm de profundidade em relação à superfície da proveta, a qual foi seca em estufa para quantificação da fração argila. A fração silte foi calculada pela diferença das demais frações (% silte = 100 - (% argila + % areia)). O resultado final foi corrigido em função do teor de água.

3.3.3 Densidade de partículas

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (Viana; Teixeira; Donagemma, 2017), com aferição do volume dos balões de 50 mL com bureta.

Transferiu-se aproximadamente 20 g de TFSA seca em estufa por 24 h a 60º C para o balão volumétrico, medindo-se o peso do balão + solo. Em seguida, adicionou-se álcool etílico (92°GL) na bureta, ajustando-se o volume à capacidade da bureta. Com a passagem do álcool da bureta até a metade do volume do balão contendo solo, foi realizada agitação manual até eliminação do ar existente entre as partículas do solo, completando posteriormente o volume do balão até o traço de aferição, tomando-se a leitura do volume de álcool gasto. O cálculo se deu pela seguinte fórmula:

$Dp = (Mbs - Mb)/(50 - Va)$ (Eq.1)

Onde: Dp = densidade de partículas do solo (g cm^{-3}); Mb = massa do balão volumétrico (g); Va = volume de álcool gasto para completar o volume do balão contendo o solo (cm^3).

3.3.4 Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo, foi utilizado o método do torrão parafinado (Embrapa, 1997), no qual torrões do solo, remanescentes das caixas de Kubiena (3.3.11), foram previamente tratados, a fim de terem suas arestas desbastadas para assumirem formato aproximadamente esférico. Cada torrão foi pesado e mergulhado em parafina fundida até completar sua impermeabilização. Depois de impermeabilizado e esfriado, o torrão parafinado foi introduzido em um béquer contendo água para obtenção do peso do torrão parafinado mergulhado em água, equivalente ao seu volume, e, ao final, levado em estufa por 24h a 60ºC. Após esse procedimento, a densidade do solo foi determinada a partir dos seguintes cálculos:

$$M = Ms\ (1 + U) \qquad \text{(Eq.2)}$$

Onde: M = Massa do torrão ao ar sem parafina; U = Umidade do torrão; Ms = Massa Seca.

$$V(\text{torrão} + \text{parafina}) = (Mp - Mpa)/Da \qquad \text{(Eq.3)}$$

Onde: Mp = Massa do torrão ao ar com parafina; Mpa = Massa do torrão com parafina imerso em água destilada.

$$V(\text{parafina}) = (Mp - M) / Dp \qquad \text{(Eq.4)}$$

Onde: Dp = Densidade da parafina = 0,8 g cm^{-3}

$$V(\text{torrão}) = V\ (\text{torrão} + \text{parafina}) - V(\text{parafina}) \qquad \text{(Eq.5)}$$

$$Ds = Ms / V(\text{torrão})$$

Onde: Ds = Densidade do solo

3.3.5 Carbono total do solo

A análise do C total dos solos e das rochas foi feita por combustão seca em analisador elementar, modelo Vario TOC, sendo as pesagens das amostras (2 a 5 mg) realizadas em balança analítica da marca METTLER TOLEDO, com precisão de pesagem de 0,01 mg.

Todas as amostras foram maceradas em almofariz, peneiradas em malha de 0,25 mm e armazenadas em cápsulas de estanho, sendo, em seguida, incineradas em temperatura aproximada de 950 ºC, por 5 min, em tubo de quartzo, sendo utilizado como carreador gás oxigênio, com 99,998 % de pureza. Após a combustão, toda a matéria orgânica foi convertida em CO_2 e um sensor infravermelho detectou sua quantidade gerada pela combustão, relacionando-a automaticamente com a quantidade de C existente na amostra. Para a confecção da curva-padrão de C do analisador automático, foram utilizadas amostras puras para análise de PHP (Potassium hydrogen phthalate, 47,05 % de C) e de sucrose (42,1 % de C).

3.3.6 Nitrogênio total do solo, nitrato e amônio

O N total dos solos foi determinado após por digestão sulfúrica seguido de destilação Kjeldahl (Keeney; Nelson, 1982). A quantificação do N existente na solução de ácido bórico ocorre pela titulação da solução com ácido sulfúrico, até que se observe o retorno da cor vermelha, que corresponde ao ponto de viragem para condição mais ácida.

De modo semelhante, a extração do nitrato e amônio se deu por meio da extração com solução de KCl 1,0 mol L^{-1} e destilação Kjeldahl (Keeney; Nelson, 1982).

3.3.7 Espectroscopia de infravermelho

As amostras de TFSA foram secas em estufa (60 °C), maceradas em almofariz e passadas em peneira nylon de 50 μm para maior homogeneização. O equipamento utilizado foi o espectrômetro Agilent Cary 630 FTIR equipado com interface de amostra ATR (cristal ZnSe) com 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}, usado na faixa espectral 4000 – 650 cm^{-1}. Foram prensadas como parte da interface ATR para garantir o contato entre o pó moído e o sensor durante a coleta de espectros. As medições foram supervisionadas usando o *software* MicroLab FTIR. Após cada medição, o cristal foi limpo com álcool isopropílico puro, e uma varredura de

fundo foi realizada para equilibrar as mudanças atmosféricas e de fundo da amostra.

O espectro de infravermelho consiste na representação gráfica da correlação entre a intensidade de absorbância (A) e a energia da radiação de IV, expressa em comprimento de ondas.

3.3.8 Composição química total por fluorescência de raios-X

Amostras da terra fina seca ao ar de solo e de rocha foram caracterizadas via fluorescência de raios-X por onda dispersiva (WDXRF). As amostras foram maceradas em almofariz, passadas em peneira de nylon de 50 µm. Em seguida, foi adicionado pó de cera Hoechst C (Merck®- $C_{38}H_{76}N_2O_2$) à mistura, numa relação solo:cera de 9:1. A mistura foi comprimida com prensa hidráulica. A carga máxima aplicada variou em razão da quantidade de argila de cada solo, sendo que, quanto maior o teor de argila, menor a carga. As pastilhas prensadas foram lidas no espectrômetro da marca Bruker® modelo S8 Tiger operado pelo programa Quant-Express. As condições operacionais utilizadas no S8 Tiger foram: tubo de raios-X Rh (máximo de 60 kV) com janela de Be de 75 µm; cristais analisadores - (LiF200, LiF220, PET, XS-55 e XS-C), 20-60 kV, 5-170 mA, potência de excitação de 4 kW, dois detectores (contador de fluxo e cintilação), dois filtros (Al e Cu), dois colimadores (0,23 e 0,46°) de feixe (34 mm). Para aquisição espectral dos dados, processamento, identificação e quantificação dos elementos, foi utilizado o *software* Spectraplus 2.2.3.2 (Geo-quant test).

3.3.9 Difração de raios-X

Para proceder as análises mineralógicas, foram separadas as frações areia, argila e o pó da rocha, de cada perfil estudado. Para a obtenção do máximo da fração argila, foram feitos sucessivos sifonamentos da suspensão passada em peneira de 53 µm, até a fração em suspensão apresentar aspecto límpido, indicativo que o máximo de argila já havia sido extraído. Para facilitar o processo de secagem, as amostras de argilas foram floculadas com Mg (0,1 mol L^{-1} $MgCl_2$) a fim de promover a sua sedimentação. As amostras foram maceradas em almofariz de ágata, e inicialmente analisadas na forma de pó sem orientação, na faixa de 5 a 50 º2θ em difratômetro Siemens D 5000 com radiação CuKα, operando a 40 kV e 25 mA.

Para evidenciação de minerais do tipo 2:1, amostras de argila dos horizontes A e B (ou C para o Neossolo) passaram por oxidação da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio 30% (v/v), por conterem mais de 1% de carbono orgânico. Em seguida, fez-se um tratamento com ditionito-citrato-bicarbonato de Na para extração dos óxidos de Fe pedogênicos (Inda Junior; Kämpf, 2003). As amostras foram então saturadas com Mg (0,5 mol L^{-1} $MgCl_2$) e K (1 mol L^{-1} KCl) à temperatura ambiente (20 ºC). As amostras saturadas com Mg foram solvatadas com vapor de etileno glicol em dessecador por 48 horas a 60ºC, e analisadas na faixa de 5 a 20 º 2θ. As amostras saturadas com K^+ passaram por tratamentos térmicos (350 e 550 °C) e foram lidas na faixa de 5 a 20 º 2θ. A área e a posição das reflexões nos difratogramas foram obtidas com o software Bruker EVA 3.0. Os minerais foram identificados com base em dados de difração relatados por Brown e Brindley (1980).

3.3.10 Susceptibilidade magnética

A susceptibilidade magnética foi determinada na TFSA, na fração argila e nos fragmentos de rocha. As amostras foram quantitativamente transferidas para tubetes de plástico, em um volume de 10 cm^3. A suscetibilidade magnética das amostras foi determinada em equipamento Bartington MS2, com um sensor Bartington MS2B, onde a baixa frequência (χ_{LF}) foi determinada em 0,47 kHz e alta frequência (χ_{HF}) em 4,7 kHz. A determinação da dependência da frequência em relação à susceptibilidade magnética (χ_{FD}, %) foi dada pela diferença entre as medidas em baixa e alta frequência, conforme a equação: χ_{FD} (%) = 100 x $[(\chi_{LF} - \chi_{HF})/\chi_{LF}]$.

3.3.11 Análises Micromorfológicas

Foram coletadas amostras indeformadas para estudos de micromorfologia nos horizontes B (C para o Neossolo) com caixa de Kubiena. Estas amostras foram secas ao ar, lentamente, durante vários dias. As amostras foram então impregnadas com resina epóxi e submetidas a vácuo por vinte e quatro horas para minimizar bolhas de ar e depois aquecidas a 100 ºC por 4 horas e 140 ºC por 4 horas para endurecimento e cura. Os blocos de resina endurecida foram cortados com serra de diamante, polidos com lixa de corindon e montados em lâminas de vidro com resina epóxi Hillquist® 7A/3B. Por fim, os blocos montados foram seccionados e polidos até a espessura ideal de 30 μm para análise micromorfológica, conforme recomendado por Murphy (1986), e analisados em microscópio petrográfico. As

seções delgadas, confeccionadas para a análise micromorfológica, foram descritas de acordo com Stoops (2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

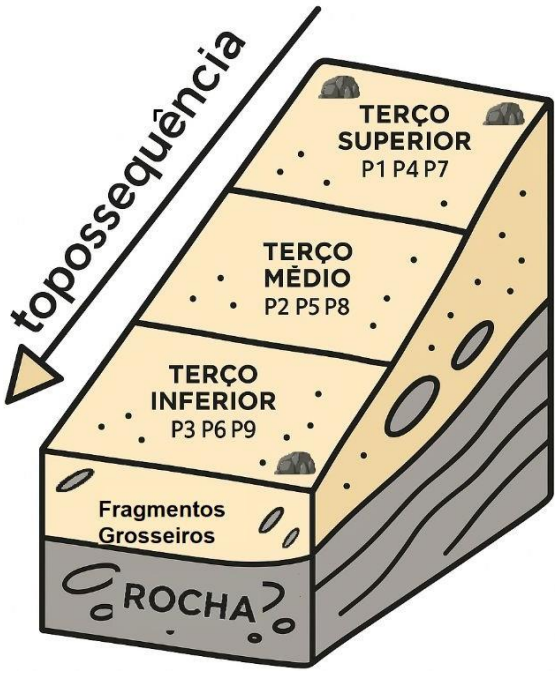
4.1 Classificação, física e química dos solos

Os solos foram categorizados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022) conforme a tabela 2, abaixo:

Tabela 2: Categorização dos perfis segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e sua correlação com a Soil Taxonomy e posição na paisagem.

PERFIL	Local	Posição	SiBCS	Soil Taxonomy
P1	Bom Sucesso (NE)	Terço superior	CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico	Oxic Dystrudepts
P2	Bom Sucesso (NE)	Terço médio	CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico	Oxic Dystrudepts
P3	Bom Sucesso (NE)	Terço inferior	NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico	Lithic Hapludox
P4	Bom Sucesso (SW)	Terço superior	LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico	Typic Hapludox
P5	Bom Sucesso (SW)	Terço médio	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Acriférrico	Typic Hapludox
P6	Bom Sucesso (SW)	Terço inferior	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distroférrico	Typic Hapludox
P7	Piedade	Terço superior	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico	Lithic Udorthents
P8	Piedade	Terço médio	PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário latossólico	Petroferric Hapludox
P9	Piedade	Terço inferior	LATOSSOLO AMARELO Distrófico	Typic Hapludox

Fonte: Autor



Fonte: Autor

Figura 4: Croquis dos perfis de solos amostrados.

Observa-se uma grande influência altitudinal na formação destes solos. Na porção nordeste da Serra de Bom Sucesso, com altitudes acima de 1000 m e declividades superiores a 75 %, originaram-se dois solos menos desenvolvidos (Cambissolos), enquanto na porção sudoeste, com menores altitudes e menores declividades, desenvolveram-se solos mais profundos (Latossolos). A área próxima do topo da Serra da Piedade sofreu a maior influência da altitude (>1511 m), sendo recoberta por uma vegetação altimontana sobre um Neossolo Regolítico, de estrutura fraca e pouco desenvolvido, ao passo que no terço médio, mesmo sobre Plintossolo Pétrico com uma camada concrecionária de lateritas (+ 7 cm de espessura) a aproximadamente 40 cm de profundidade, a vegetação é mais abundante, similar à mata Atlântica da Serra de Bom Sucesso, com o aprofundamento gradual de seus solos até a área do terço inferior.

Embora o contato lítico nunca tenha sido alcançado nos perfis descritos, todos os solos e horizontes apresentaram alto teor (31-71 %) de cascalhos, calhaus e partículas mais grosseiras, principalmente itabirito e outros fragmentos de rochas resistentes e, no caso do Latossolo concrecionário, petroplintitas (lateritas ou concreções secundárias de óxido de ferro) e também fragmentos do itabirito.

As análises morfológicas dos perfis (Tabela 3) indicaram, de modo geral, a ocorrência

de solos de textura argilosa cascalhenta ou mais fina, com teores de argila superiores a 30 %, à exceção do Neossolo Regolítico da Serra da Piedade. A literatura sobre formações ferríferas, como as da Bacia Hamersley da Austrália Ocidental (Trendall, 2002), sugere que elas às vezes possuem textura grosseira, que geram substratos altamente ricos em materiais silicosos e férricos, portanto altamente resistentes ao intemperismo, como observados por Souza (2006) no QF.

A maioria dos solos apresentou cores vermelhas ou avermelhadas (matiz 5YR ou mais vermelho), com apenas o Latossolo do terço inferior na Serra da Piedade com matizes 7,5YR. A estrutura do solo foi bem desenvolvida em todos os solos, exceto no Neossolo na Serra da Piedade, muito raso e com baixo teor de argila.

Tabela 3: Caracterização física e morfológica dos solos e horizontes.

Hor.	Prof.	Cascalho	< 2mm Areia grossa	< 2mm Areia fina	< 2mm Silte	< 2mm Argila	Densidade de partícula	Densidade do solo	Cor úmida	Consistência		Estrutura	
	cm	dag kg $^{-1}$					g cm^{-3}			Molhada	Tamanho	Desenvolvimento	Forma
Bom Sucesso (NE) CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico – (P1) Terço superior													
A	0-3	43,6	27,0	28,1	7,6	37,2	2,86	-	5YR 5/4	lpl / lp	Media	Forte	Bloco subangular
Bi	3-33	57,5	25,1	29,1	3,1	42,7	3,33	1,98	5YR 5/4	lpl / lp	Media	Moderada	Bloco subangular
BC	33-50+	46,2	18,2	36,0	0,1	45,7	3,70	-	5YR 5/4	lpl / lp	Media	Fraca	Bloco subangular
Bom Sucesso (NE) CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico – (P2) Terço médio													
A1	0-15	51,0	38,1	21,0	13,9	27,0	2,94	-	5YR 6/4	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
A2	15-34	45,6	36,0	20,6	12,1	31,3	2,99	-	5YR 4/3	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
Bi	34-73r	37,4	41,7	14,4	12,2	31,8	3,28	1,80	2.5YR 3/4	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
Bom Sucesso (NE) NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico – (P3) Terço inferior													
A	0-11	58,6	28,5	27,1	13,0	32	2,68	-	5YR 3/3	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
B	11-60r	33,3	15,9	36,3	11,3	36,5	2,78	1,45	2.5 YR 4/4	lpl / lp	Media	mod	Bloco subangular
Bom Sucesso (SW) LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico – (P4) Terço superior													
A	0-20	38,4	28,2	10,5	25,0	36,30	2,70	-	2.5 YR 4/8	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
B	20-49	27,3	22,1	13,6	22,7	41,6	3,13	1,91	2.5 YR 5/8	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
Bw	49-85+	31,0	7,45	27,35	28,47	36,7	3,33	-	2.5 YR 5/8	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
Bom Sucesso (SW) LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Acriférrico – (P5) Terço médio													
A	0-25	49,8	26,0	24,1	13,0	36,9	3,51	-	2.5 YR 3/4	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
B	25-65	43,7	23,4	25,5	15,0	36,1	3,57	1,42	2.5 YR 4/6	lpl / lp	Grande	Forte	Bloco subangular
Bw	65-110+	41,2	19,1	28,3	22,8	29,7	3,92	-	5YR 4/6	lpl / lp	Grande	Moderada	Bloco subangular

Obs.: mp = muito pegajosa; lp = ligeiramente pegajosa; p = pegajosa; np = não pegajosa; mpl = muito plástica; lpl = ligeiramente plástica; pl = plástica; npl = não plástica.

Tabela 3: Continuação...

Hor.	Prof.	Cascalho	< 2mm Areia grossa	< 2mm Areia fina	< 2mm Silte	< 2mm Argila	Densidade de partícula	Densidade do solo	Cor úmida	Consistência	Estrutura		
	cm	dag kg^{-1}					g cm^{-3}			Molhada	Tamanho	Desenvolvimento	Forma
Bom Sucesso (SW) LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distroférrico – (P6) Terço inferior													
A1	0-20	53,5	20,7	16,1	16,4	47	2,78	-	2.5 YR3/4	lpl / lp	Pequena	-	Grumosa
A2	20-45	68,3	16,4	18,3	31,7	33,6	2,82	-	2.5 YR3/6	lpl / lp	Media	Fraca	Bloco subangular
B	45-75	57,1	24,0	20,9	19,2	36,0	3,39	1,37	2.5 YR4/6	lpl / lp	Media	Moderada	Bloco subangular
Bw	75-110+	70,9	23,7	21,7	18,8	35,7	3,23	-	5YR 5/6	lpl / lp	Media	Moderada	Bloco subangular
Piedade NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico – (P7) Terço superior													
A	0-13	49,6	42,0	31,8	7,8	18,4	3,92	2,48	10R 2.5/2	npl / np	Pequena	wea	Bloco angular
C1	13-30	43,7	23,6	48,0	10,7	17,7	4,00	-	10R 2/0	npl / np	-	-	-
C2	30-60+	43,0	30,5	51,2	7,6	10,7	4,17	-	10R 2/0	npl / np	-	-	-
Piedade PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário latossólico – (P8) Terço médio													
A1	0-20	66,0	47,3	19,1	7,7	26,0	2,94	-	10R 4/2	npl / np	Media	-	Grumosa
A2	20-40	60,4	45,7	20,0	13,0	21,3	3,92	-	10R 3/2	lpl / np	Pequena	Moderada	Bloco subangular
Bwc	40-60+	69,3	13,0	9,1	6,3	71,6	4,17	1,65	10R 3/6	npl / np	Pequena	Moderada	Bloco subangular
Piedade LATOSSOLO AMARELO Distrófico – (P9) Terço inferior													
A1	0-30	55,5	30,9	19,3	3,6	46,2	2,60	-	7.5YR 4/2	pl / lp	Media	Forte	Bloco subangular
A2	30-50	30,6	22,1	17,6	1,4	58,9	2,67	-	7.5YR 5/6	mpl / p	Media	Moderada	Bloco subangular
Bw	50-85+	32,4	10,2	28,1	1,7	60,1	2,82	1,24	7.5YR 5/8	mpl / mp	Pequena	Fraca	Bloco subangular

Fonte: Autor

Os teores de argila variaram entre 27 e 47% na Serra do Bom Sucesso e mais amplamente, 10 a 60 %, na Serra da Piedade (Tabela 3). Os teores de silte foram inferiores a 15 % em sete dos nove perfis, enquanto os teores de areia variaram de 22 a 82%, com predominância de areia grossa sobre areia fina. Essas texturas mais grosseiras são consistentes com solos de formações ferríferas, tanto em climas úmidos como os do QF (Araujo *et al*., 2014; Souza, 2006), quanto em regiões áridas, como a Austrália Ocidental (Trendall, 2002), devido à alta resistência ao intemperismo do material de origem, rico em ferro e sílica.

A densidade de partículas do solo na maioria dos horizontes superou o valor médio de 2,65 g cm^{-3}, comumente citado para solos minerais compostos principalmente por quartzo e argilas silicatadas (Reichardt & Timm, 2004). Em sete dos nove solos estudados, pelo menos um horizonte apresentou densidade de partícula superior a 3 g cm^{-3}, com dois solos na Serra da Piedade alcançando ou ultrapassando 4 g cm^{-3} na maioria dos horizontes. Essa densidade elevada reflete a abundância de minerais férricos, como hematita e magnetita, no material de origem e nos solos, que têm densidades de aproximadamente 5,20 g cm^{-3} (Dana & Hurlbut, 1969). Esse padrão foi observado anteriormente em outros solos derivados de itabirito (Costa, 2003). Embora altas densidades também possam ocorrer alguns solos derivados de rochas ultramáficas (Vilela *et al*., 2019), os valores próximos a 4 g cm^{-3} relatados neste estudo são excepcionalmente altos. A densidade aparente dos solos no horizonte subsuperficial variou de 1,24 a 2,48 g cm^{-3}, superando os valores reportados por Silva *et al*. (2009) para solos florestais (<0,99 g cm^{-3}) e aproximando-se dos valores máximos médios de 1,74 g cm^{-3} encontrados por Pádua *et al*. (2015) na camada de 10-20 cm. Esses resultados podem ser atribuídos à alta pedregosidade, à elevada densidade de partículas e ao método utilizado, torrão parafinado, que tende a superestimar os valores de densidade do solo em comparação ao método do anel volumétrico (Van Remortel; Shields, 1993).

Os solos estudados são geralmente ácidos, com pH variando entre 4,5 e 5,7, o que é consistente com a vegetação florestal sob clima úmido (Tabela 4). Apesar da presença expressiva de óxidos de Fe secundários, apenas o horizonte B do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO do terço inferior da Serra de Bom Sucesso apresentou pH-KCl (5,36) superior ao pH-H_2O (5,0), indicando predomínio de cargas positivas em subsuperfície.

Tabela 4: Características químicas dos perfis e atividade da argila.

Hor	Prof	pH		Complexo Sortivo													ATIVIDADE DA ARGILA
				K^+	P	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	P-REM	t	T	V	m	C-total	
	(cm)	(H_2O)	KCl	mg dm^{-3}			cmolc dm^{-3}				mg L^{-1}	cmolc dm^{-3}			%		
CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico – (P1) Terço superior																	
A	0-3	5,1	3,5	79	3,75	6	1,51	0,8	0,5	7,9	26,8	3,01	10,41	24,14	16,61	3,11	-
Bi	3-33	4,9	3,82	46,25	7,72	29	0,69	0,28	0,2	7,9	10,2	1,29	5,99	18,17	15,5	2,66	14
BC	33-50+	5,5	4,46	18,96	2,15	13	0,34	0,18	0	3	12,6	0,57	3,57	15,93	0	0,88	7,8
CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico – (P2) Terço médio																	
A1	0-15	4,6	3,66	119,41	5,63	11	4,51	2,05	0,4	11,4	24,8	7,27	18,27	37,58	5,5	4,84	-
A2	15-34	4,5	3,9	53,31	3,02	11	0,72	0,51	0,9	11,9	14,7	2,27	13,27	10,3	39,65	2,39	42,4
Bi	34-73r	4,7	3,46	17,29	1,75	6	0,19	0,14	0,4	5,3	12,1	0,77	5,67	6,6	51,95	1,49	17,8
NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico – (P3) Terço inferior																	
A	0-11	5,5	3,87	67,9	8,41	38	4,49	1,04	0,3	6,9	20,8	6	12,6	45,27	5	4,84	-
B	11-60r	4,7	3,62	26,92	1,45	9	0,57	0,26	0,6	7,9	15,7	1,5	8,8	10,22	40	1,89	24,12
LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico – (P4) Terço superior																	
A	0-20	5,2	3,74	48,54	2,43	6	0,85	0,41	0,4	5,9	11,6	1,78	7,28	19,02	22,47	2,94	-
B	20-49	5,2	3,99	18,13	1,45	5	0,2	0,14	0,2	6	7,4	0,59	6,39	6,05	33,9	1,81	15,4
Bw	49-85+	5	4,2	12,06	1,18	4	0,29	0,17	0,1	5,2	6,9	0,59	5,69	8,63	19,95	1,49	15,5
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO acriférrico – (P5) Terço médio																	
A	0-25	4,8	3,87	62,52	4,59	6	1,4	0,67	0,4	7	15,4	2,63	9,23	24,16	15,21	2,76	-
B	25-65	5,3	4,55	15,2	1,3	6	0,34	0,22	0	3,6	10,5	0,6	4,2	14,26	0	0,98	11.6
Bw	65-110+	5,3	5,04	6,37	0,72	4	0,26	0,17	0	2,1	13,7	0,45	2,55	17,5	0	0,31	8.6

Tabela 4: Continuação...

Hor	Prof	pH		Complexo Sortivo													ATIVIDADE DA ARGILA
				K^+	P	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	P-REM	t	T	V	m	C-total	
	(cm)	(H_2O)	KCl	mg dm^{-3}			cmolc dm^{-3}				mg L^{-1}	cmolc dm^{-3}			%		
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distroférrico – (P6) Terço inferior																	
A1	0-20	5,7	5,36	124,1	3,68	6	12,72	2,65	0,2	2,3	34,4	15,89	17,99	87,2	1,04	7,37	-
A2	20-45	5,2	5,08	78,57	2,14	6	7,42	1,87	0,1	3,2	24,3	9,59	12,69	74,79	0	3,56	-
B	45-75	5	5,36	18,8	0,7	7	1,03	0,83	0	3,2	9,2	1,91	5,11	37,34	0	0,8	14,21
Bw	75-110+	4,9	4,91	9,13	0,4	7	0,43	0,29	0	1,6	12,1	0,74	2,34	31,77	0	0,56	6,55
NEOSSOLO REGOLÍTICO Ditrófico – (P7) Terço superior																	
A	0-13	4,7	3,03	22,2	1,54	5	1,52	0,35	0,4	4,4	53,7	2,33	6,33	30,44	17,17	1,02	-
C1	13-30	5,2	3,52	5,06	0,1	3	2,55	0,61	0,1	2,2	59,1	2,27	5,37	59,09	3,03	0,33	30,6
C2	30-60+	5,5	4,28	2,44	0,1	3	2,09	0,6	0,1	1,1	63,1	2,8	3,8	70,95	3,03	0,15	35,4
PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário latossólico – (P8) Terço médio																	
A1	0-20	4,3	4,21	73,5	4,04	7	0,27	0,11	0,1	23,1	16,8	0,67	23,67	2,4	14,93	7,37	-
A2	20-40	4,8	3,57	33,24	3,45	14	0,39	0,24	1,3	9	9	2,02	9,72	7,36	64,36	5,32	-
Bwc	40-60+	4,9	3,8	19,91	2,27	12	0,52	0,24	1	7,1	10,4	1,81	7,91	10,25	55,25	2,27	11,1
LATOSSOLO AMARELO Distrófico – (P9) Terço inferior																	
A1	0-30	5,1	3,82	102,27	0,1	15	4,03	1,03	0,5	4,9	16,5	5,82	10,22	52,08	8,59	2,68	-
A2	30-50	5	3,6	43,29	0,1	7	1,58	0,43	1	5,6	11,1	3,12	7,72	27,47	32,05	1,92	-
Bw	50-85+	5,2	3,96	31,03	0,1	6	1,9	0,58	0,3	3,4	8	2,86	5,96	42,95	10,49	1,48	9,91

Fonte: Autor

Apesar da reação ácida, os solos analisados apresentaram teores insignificantes ou muito baixos de Al trocável, contrastando com o padrão observado em solos de Minas Gerais, onde os valores médios de Al atingiram 1,1 $cmol_c$ dm^{-3} (Skorupa *et al*., 2012). Essa baixa disponibilidade de Al é favorável à agricultura de baixa intensidade, uma vez que pode reduzir ou até eliminar a necessidade de calagem, dependendo da tolerância da cultura implantada.

Os teores de Ca variaram de médios (1,21 - 2,40 $cmol_c$ dm^{-3}) a muito bons (> 4,00 $cmol_c$ dm^{-3}), de acordo com os critérios da CFSEMG (1999), com a exceção do Latossolo Vermelho (Terço superior de Bom Sucesso – SW) e do Plintossolo Pétrico (Piedade), que apresentaram valores sensivelmente inferiores. Este último foi o único a não ultrapassar superficialmente a média de 0,8 cmolc dm^{-3} observada em florestas estacionais semideciduais de Minas Gerais (Skorupa *et al*., 2012). Valores muito elevados como os registrados no Latossolo Vermelho-Amarelo de Bom Sucesso – SW (12 $cmol_c$ dm^{-3}) podem indicar desequilíbrios nutricionais, potencialmente interferindo na absorção de outros cátions essenciais.

Os teores de Mg, embora menores em valores absolutos, variaram de muito baixo a muito bons (≤ 0,15 $cmol_c$ dm^{-3} a >1,5 $cmol_c$ dm^{-3}), o que contribuiu para a manutenção de uma relação Ca:Mg equilibrada, variando entre 1,8:1 e 4,8:1 nas camadas superficiais. Esses valores indicam a ausência de influência significativa de rochas ultramáficas na pedogênese local, observado em algumas áreas próximas a afloramentos de itabirito (Araújo *et al*., 2014; Costa, 2003).

A disponibilidade de P nos solos estudados variou de muito baixa a baixa, com exceção do Nitossolo Vermelho, que apresentou disponibilidade média, de acordo com a classificação da CFSEMG (1999). Nas duas serras analisadas, pelo menos um perfil apresentou valores superiores à média estadual de 3,7 mg dm^{-3} (Skorupa *et al*., 2012). Embora esses valores possam ser considerados relativamente altos em comparação com o esperado para a região, dado o contexto geológico dominado por itabiritos, eles ainda são insuficientes para práticas agrícolas. Para a olericultura, praticada em regiões próximas à Serra da Piedade, a CFSEMG (1999) indica que o teor de P considerado bom seria de 72 mg dm^{-3}. Já para o cafeeiro, outra cultura cultivada na região, o limite superior da classe "bom" é de 54 mg dm^{-3}, para teores de argila entre 60 a 35%, o que é significativamente superior aos encontrados nos solos estudados. Os teores de P-remanescente na superfície foram similares ou inferiores aos descritos por Portugal *et al*. (2010) para vegetação nativa na Zona da Mata Mineira (26,4 mg L^{-1}), exceto para o Neossolo Regolítico, que apresentou valores superiores devido a seu baixo teor de argila e consequente menos sorção de fósforo. Em profundidade, os teores de P-rem diminuíram significativamente, exceto no Neossolo Regolítico.

Os valores de CTC a pH 7,0 variaram de médios a muito altos, enquanto a V% apresentou comportamento semelhante, com exceção do Nitossolo Vermelho e do Plintossolo Pétrico, que exibiram valores classificados como baixos e muito baixos, respectivamente, segundo os critérios da CFSEMG (1999). Na Serra de Bom Sucesso, o Cambissolo Háplico e o Nitossolo Vermelho da porção nordeste apresentaram CTC total de 18,3 e 12,6 $cmol_c$ dm^{-3}, com saturações por bases de 37,6% e 45,3%, respectivamente. Por outro lado, o Latossolo Vermelho-Amarelo localizado na porção sudoeste da mesma serra apresentou CTC total de 18,0 $cmol_c$ dm^{-3} e uma saturação por bases de 87,2%, valor elevado, diretamente associado aos altos teores de Ca e Mg. Na Serra da Piedade, o Latossolo Amarelo registrou CTC total de 10,2 $cmol_c$ dm^{-3} e saturação por bases de 52,1%, valores considerados elevados para os padrões da região. Embora esses índices apontem para uma fertilidade natural potencialmente elevada, sugerem um potencial desequilíbrio nutricional, principalmente em razão da grande predominância de Ca e Mg, o que pode comprometer a disponibilidade e o aproveitamento de outros nutrientes pelas plantas.

Os teores de micronutrientes extraídos pelo método Mehlich-1 (Tabela 5) variaram entre as áreas estudadas, sendo classificados entre muito baixos e altos, de acordo com a CFSEMG (1999). Essa variabilidade pode ser atribuída, em parte, à estreita faixa dos limites entre as classes de interpretação, o que pode levar à indicação de baixos teores mesmo em situações em que os micronutrientes não representam o principal fator limitante à produção agrícola. No entanto, essa variação mostrou-se pouco expressiva dentro de cada serra e entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, sugerindo relativa uniformidade na distribuição vertical e local desses nutrientes nos perfis analisados.

Tabela 5: Teores disponíveis de micronutrientes dos perfis de solo.

	Perfil	Hor	Prof	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
			(cm)			mg dm^{-3}			
Bom Sucesso - NE	terço	A	0-3	3,1	45,4	156	3,04	0,18	10,1
	Superior	Bi	4-33	1,3	43,6	38	0,43	0,14	32,8
	P1	BC	33-50+	0,4	45,6	17,8	0,3	0,09	26
	Terço	A1	0-15	3,3	69,5	179,3	0,62	0,2	17,9
	Médio	A2	15-34	1,1	69,8	56,1	0,54	0,15	23,9
	P2	Bi	34-73r	0,2	41,4	19	0,39	0,08	27,5
	terço	A	0-11	5,5	57,2	165,2	0,43	0,17	11,9
	Inferior	B	11-60r	2,2	37,4	91,2	3,67	0,05	5
	P3								
Bom Sucesso - SW	Terço	A	0-20	1,3	31,2	60,5	1,57	0,14	24,2
	Superior	B	20-49	0,2	31,1	38,8	2,24	0,18	13,1
	P4	Bw	49-85+	0,3	31,7	32,9	3,08	0,11	15
	Terço	A	0-25	1,6	24	186,2	3,64	0,16	13,1
	Médio	B	25-65	0,5	23,6	74,9	7,44	0,1	5,7
	P5	Bw	65-110+	0,3	49,2	26,3	2,62	0,14	5,2
	terço	A1	0-20	17	15,3	378,9	0,82	0,2	20
	Inferior	A2	20-45	10,7	21,9	392	4,36	0,24	11,5
	P6	B	45-75	0,9	60,2	152,5	5,96	0,1	41
		Bw	75-110+	0,8	58,3	114,6	1,74	0,18	11,6
Piedade	Terço	A	0-13	0,9	144	3	0,06	0,15	3,8
	Superior	C1	13-30	0	93,9	0,4	0	0,13	2,9
	P7	C2	30-60+	0	50,5	0,3	0	0,09	12
	terço	A	0-20	1,8		29,2	0,39	0,16	6
	Médio	Ac	20-40	5	68,7	10,1	0,19	0,08	14,4
	P8	Bwc	40-60+	0	44,8	3,8	0,17	0,07	4,5
	Terço	A1	0-30	1,3	34,1	20,5	0,84	0,06	1,5
	Inferior	A2	30-50	0	24,1	8,1	0,75	0,02	2,2
	P9	Bw	50-85+	0	20,6	5,7	0,54	0,02	0

Fonte: Autor

Dentre os micronutrientes, destaca-se as elevadas concentrações de Mn disponível nos solos da Serra de Bom Sucesso, especialmente nos horizontes A, onde os teores foram sempre superiores. De acordo com a classificação da CFSEMG (1999) valores acima de 12 mg dm^{-3} já são considerados altos. Entretanto, esse comportamento é consistente com os resultados reportados por Carvalho Filho *et al*. (2011) e pode ser atribuído à presença de nódulos e concreções ferruginosas, características de solos derivados de itabiritos (Ross; Franzmeier; Roth, 1976). A ocorrência conjunta de altos teores de Mn e Fe nesses solos está relacionada à semelhança de seus comportamentos geoquímicos, particularmente o ciclo redox, que favorece sua co-precipitação e mobilidade conjunta na solução do solo, sobretudo em ambientes com condições redutoras (Ching *et al*., 2016).

Os teores disponíveis de Fe, Zn, Cu e B foram, em geral, mais elevados nas camadas superficiais dos solos, muito em função da maior concentração de matéria orgânica e da atividade biológica mais intensa nesses horizontes. Esse padrão é consistente com os dados de Chaves e Corrêa (2003) para áreas de reflorestamento com *Pinus caribaea* no Cerrado de Minas Gerais. A acumulação superficial desses micronutrientes está fortemente associada ao ciclo bioquímico da matéria orgânica do solo, conforme já discutido por Lopes (1999), que destaca a influência da matéria orgânica e das condições oxidativas na disponibilidade e mobilidade de micronutrientes em solos tropicais.

Em contraste, os menores teores disponíveis foram observados no topo da Serra da Piedade, exceto para o Fe, o que pode estar relacionado à ausência de cobertura vegetal permanente e densa, além das características do material de origem.

O enxofre (S) disponível foi o único elemento que não apresentou tendência de acúmulo superficial, comportamento também descrito por Siqueira Neto *et al*. (2009) em solos sob Cerradão e em sistemas de cultivo convencional e plantio direto.

O B foi o único micronutriente que apresentou teores consistentemente baixos (0,16 - 0,35 mg dm^{-3}) ou muito baixos ($\leq$ 0,15 mg dm^{-3}) em todos os perfis avaliados, conforme a CFSEMG (1999). É, entre os micronutrientes, aquele que mais frequentemente se apresenta deficiente no solo e tem sua disponibilidade altamente afetada por stress hídrico (Mattiello *et al*., 2009).

A Tabela 6 apresenta os teores totais de C orgânico, N e suas frações, bem como as relações C:N, para todos os perfis estudados, incluindo o C total presente em fragmentos de rochas.

Tabela 6: Teores de Carbono e Nitrogênio dos perfis em profundidade.

	Perfil	Hor	carbonatos*	C - TOTAL	N - TOTAL	N- NH_4^+	N-NO_3^-	C:N
			-	dag kg^{-1}	dag kg^{-1}	mg kg^{-1}		-
Bom Sucesso - NE	terço	A	NÃO	3,11	0,25	19,8	2,4	13
	superior	Bi	NÃO	2,66	0,17	7,6	0,8	16
	P1	BC	NÃO	0,88	0,06	9,6	0,8	15
		ROCHA	SIM	0,38	-	-	-	-
	terço	A1	NÃO	4,84	0,53	26,9	3,3	9
	médio	A2	NÃO	2,39	0,22	14,3	0,3	11
	P2	Bi	SIM	1,49	0,32	9,8	0,9	5
		ROCHA	SIM	0,45	-	-	-	-
	terço	A	NAO	4,84	0,24	17,4	3,7	21
	inferior	B	SIM	1,89	0,22	11,4	5,8	9
	P3	ROCHA	SIM	0,59	-	-	-	-
Bom Sucesso - SW	terço	A	NÃO	2,94	0,27	13,4	1,2	11
	superior	B	SIM	1,81	0,14	8,0	3,8	13
	P4	Bw	SIM	1,49	0,09	8,9	0,8	16
		ROCHA	SIM	0,20	-	-	-	-
	terço	A	SIM	2,76	0,28	16,9	2,4	10
	médio	B	NÃO	0,98	0,13	7,1	0,7	8
	P5	Bw	SIM	0,31	0,02	4,4	2,8	13
		ROCHA	SIM	0,24	-	-	-	-
	terço	A1	SIM	7,37	0,63	45,2	8,2	12
	inferior	A2	SIM	3,56	0,34	31,6	2,5	11
	P6	B	SIM	0,80	0,12	10,5	1,6	7
		Bw	NÃO	0,56	0,10	9,8	2,1	5
		ROCHA	SIM	0,13	-	-	-	-
Piedade	terço	A	SIM	1,02	0,13	9,8	1,5	8
	superior	C1	SIM	0,33	0,05	10,3	1,8	6
	P7	C2	SIM	0,15	0,02	4,5	1,1	10
		ROCHA	SIM	0,14	-	-	-	-
	terço	A	SIM	7,37	0,59	27,8	3,4	13
	médio	Ac	SIM	5,32	0,52	12,3	0,5	10
	P8	Bwc	SIM	2,27	0,19	11,8	2,0	12
		ROCHA	SIM	0,81	-	-	-	-
	terço	A1	SIM	2,68	0,25	15,8	2,0	11
	inferior	A2	NÃO	1,92	0,18	10,2	2,1	11
	P9	Bw	NÃO	1,48	0,12	8,5	1,9	12
		ROCHA	SIM	0,18	-	-	-	-

(*) Reação de HCl 0,1M a 80ºC

Fonte: Autor

Para este estudo, os teores de carbono solo foram determinados por combustão seca e mostraram-se superiores aos encontrados por Carvalho Filho, Curi e Shinzato (2010) em solos itabiríticos do QF, sendo comparáveis à média de 3,2% para florestas nativas em Minas Gerais (Skorupa *et al*., 2012). No entanto, diferentemente dos estudos citados que utilizaram a metodologia Walkley-Black, que não inclui carbonatos e está em desuso devido a implicações ambientais (Gatto *et al*., 2009), o método de combustão seca deste estudo contabiliza carbonatos (CO_3^{-2}) de Mg, Fe e Mn, presentes na maioria dos horizontes, conforme indicado pela efervescência com HCl diluído a 80 °C. Assim, comparações diretas com outros estudos devem ser evitadas devido às diferenças metodológicas, sendo realizadas apenas pela falta de estudos com metodologia similar.

A presença desses carbonatos pode ser explicada por Pires *et al*. (2014), que sugere que as bandas ricas em quartzo do itabirito contêm cristais de carbonatos, comumente de Fe e Mg, indicando a possível presença de siderita ($FeCO_3$), magnesita ($MgCO_3$) ou rodocrosita ($MnCO_3$). A ausência de reação de carbonatos à temperatura ambiente sugere a ausência de quantidades significativas de calcita ($CaCO_3$). Além disso, a ausência total de reação em alguns solos pode estar associada às condições tropicais úmidas da região e ao avanço do intemperismo na decomposição química de carbonatos por meio de águas superficiais (Rosière; Chemale Jr., 2000).

Houve uma tendência de menores concentrações de carbono nos terços superiores de cada topossequência, enquanto os solos dos terços médios e inferiores apresentaram maiores teores, associados a maiores fertilidades (Tabela 4). Surpreendentemente, os maiores teores de carbono (7,37%) foram encontrados nos horizontes A tanto do solo mais fértil e úmido (terço inferior de Bom Sucesso SW) como do menos fértil (terço médio da Piedade). Em geral, altos teores de COS, especialmente nas camadas superficiais, melhoram a qualidade do solo e contribui fortemente para a elevação da CTC, principalmente devido à geração de cargas negativas e retenção de nutrientes. Isso é particularmente relevante considerando a mineralogia desses solos, rica em óxidos de ferro, que pode limitar muito a disponibilidade de fosfato (PO_4^{3-}) (Oliveira *et al*., 2021).

A aparente dicotomia observada nos dois maiores teores de COS do presente estudo pode ser explicada por dois mecanismos distintos. Por um lado, o solo de Bom Sucesso SW do terço inferior com elevados valores de capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%), os quais favorecem maior aporte da MOS. Mais especificamente, pelo efeito da baixa posição na paisagem, resultando em alta umidade e fluxo de nutrientes em solução, a partir da parte superior do terreno. Por outro lado, também se observa teor de COS > 7% no

solo de menor fertilidade, associado, talvez, ao bom aporte de material orgânico e umidade, às condições edáficas, marcadas por severa limitação nutricional, que pode restringir parcialmente a atividade da pedofauna e dos microrganismos decompositores (Silva *et al*., 1994). Essa limitação biológica reduz a taxa de decomposição da MOS, favorecendo seu acúmulo ao longo do tempo. Portanto, a acumulação de matéria orgânica pode ocorrer tanto em ambientes com alta entrada de resíduos orgânicos e elevada atividade biológica, quanto em ambientes onde a decomposição é naturalmente limitada por restrições químicas ou biológicas.

É possível ainda, que os altos teores de COS sejam mais provavelmente devidos à alta umidade do solo e por fatores topográficos, que também causaram a formação de canga ferruginosa pouco permeável em subsuperfície, o que reforça a retenção de água no local.

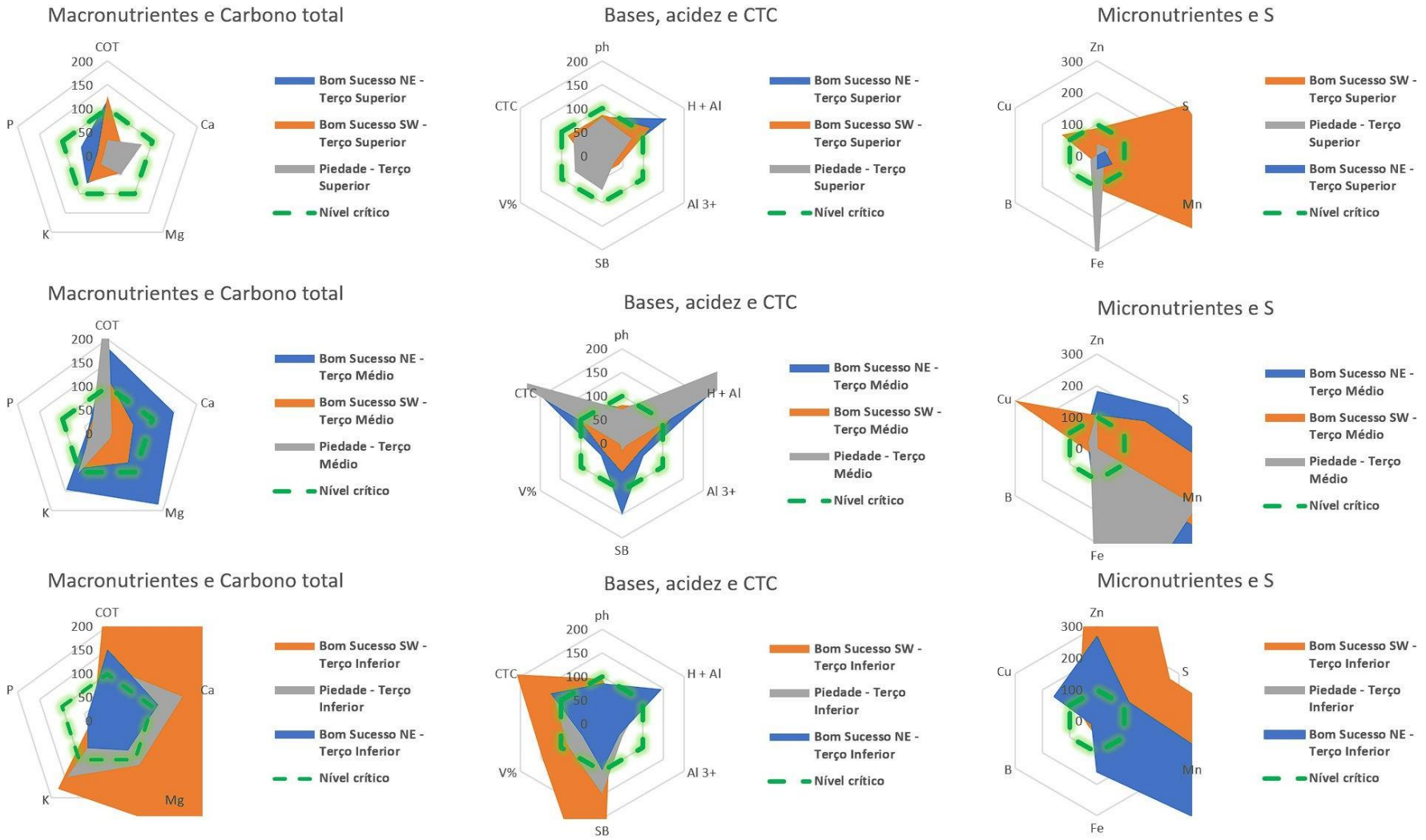
Os teores de N total foram semelhantes aos reportados por Giácomo, Pereira e Balieiro (2008) sob floresta secundária no Estado do Rio de Janeiro. Apenas o solo do terço inferior da Serra de Bom Sucesso (SW) apresentou sensivelmente os maiores teores de N, como também de C, que provavelmente se deram em função da sua textura mais argilosa que pode favorecer a preservação da matéria orgânica (Munner; Oades, 1989). Todos os valores diminuíram em profundidade, muito em função da diminuição da fração orgânica.

Os teores de N-amônio ($N\text{-}NH_4^+$) foram baixos, mas consistentemente superiores aos de N-nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) e diminuíram com a profundidade, corroborando estudos como o de Oliveira *et al*. (2016) em florestas secundárias do Pará. Isso pode ser atribuído à reduzida lixiviação do amônio devido à sua adsorção nas partículas de carga negativa do solo e nos grupos funcionais da matéria orgânica. Mudanças no uso da terra podem alterar a relação nitrato-amônio nas camadas superficiais, como destacado por D'Andréa *et al*. (2004), levando à aceleração da perda de MOS e ao aumento da atividade de microrganismos nitrificadores, que são mais ativos em pH acima de 6,0 (Paul; Clark, 1989). Essa dinâmica pode ter implicações significativas para a fertilidade do solo e o ciclo de nutrientes, embora admita-se que a compreensão sobre os fatores que afetam a retenção de nitrogênio nesses solos ainda é limitada.

A relação C:N média dos horizontes superficiais foi de 12, valor superior ao reportado por Amorim *et al*. (2023), que observaram uma média de 9,5 em solos desenvolvidos a partir de itabirito. Apenas o terço superior da Serra da Piedade apresentou um valor inferior (8), possivelmente em função da menor densidade de cobertura vegetal, com reduzida deposição de resíduos de lenta decomposição, como galhos e material lenhoso. Tendência semelhante foi relatada por Vasconcelos *et al*. (2016) em solos lateríticos do Pará. A elevação da relação C:N nos demais locais sugere maior produção e preservação da MOS, o que pode explicar, em parte, os maiores teores observados neste estudo. Observou-se ainda, um aumento da relação C:N

com a profundidade, sobretudo nos perfis da Serra da Piedade, o que pode estar relacionado à maior influência de carbonatos e à menor participação de compostos orgânicos nitrogenados de rápida decomposição na fração mais profunda do solo.

O balanço nutricional dos solos foi interpretado com o auxílio de fertigramas, nos quais a área delimitada pelos polígonos representa visualmente as demandas de manejo para cada elemento analisado (Figura 5). Com o objetivo de enfatizar a camada de 0–20 cm, de maior relevância para o uso agrícola, os dados da análise química foram ponderados para essa profundidade. Para a interpretação dos resultados, adotou-se como referência o valor crítico ideal correspondente ao limite superior da faixa classificada como média, conforme estabelecido por CFSEMG (1999).



Fonte: Autor

Figura 5: Fertigrama dos solos de Bom Sucesso e Piedade para a camada de 0 a 20 cm.

Os indicadores de fertilidade do solo mostraram maior variabilidade em comparação com as propriedades físicas e o pH, mas todas as três topossequências apresentaram solos com CTC e V% altas, mas acompanhadas de algum desbalanço nutricional. A fertilidade dos solos aumentou gradualmente do terço superior para o terço inferior, acompanhada por um maior teor de matéria orgânica, o que é desejável para o equilíbrio da disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Além disso, a influência do material de origem, baixo em Al, resultou em baixos valores de acidez ativa. Os horizontes superficiais geralmente apresentaram os maiores teores de cátions básicos, exceto no Neossolo, onde os horizontes C subjacentes foram mais férteis, provavelmente devido à proximidade com o material de origem.

No terço superior da Serra da Piedade, o Neossolo Regolítico se destacou por sua menor fertilidade (Tabela 4 e Figura 5). Além disso, esse solo apresentou baixo teor de carbono total (COT), conforme mostrado na Tabela 6, e altos valores de Fe disponível, conforme Tabela 5. Essas características são talvez resultado de fatores como o clima mais frio, a ausência de cobertura florestal na área e o menor desenvolvimento estrutural do solo. Tais características são semelhantes às comumente observadas nas cristas do QF, como as descritas por Costa *et al*. (2003). Em contraste marcante, o Latossolo Vermelho-Amarelo (Bom Sucesso - SW) apresentou fertilidade significativamente maior em comparação com as demais áreas estudadas. Esse solo exibiu teores muito altos de Ca e Mg trocáveis, alcançando valores de 12,7 e 2,65 $cmol_c\ dm^{-3}$, respectivamente, além de uma camada superficial espessa de 45 cm (horizontes A1 + A2, Tabela 4). A matéria orgânica contribuiu significativamente para a qualidade desse solo, pois está >300 % acima do limite crítico. A fertilidade incomum observada nesse perfil corrobora os resultados relatados por Araujo *et al*. (2014) para um Luvissolo próximo. A explicação para essa fertilidade não foi satisfatoriamente elucidada, o que motivou o presente estudo a investigar mais profundamente os fatores contribuintes para essa característica singular.

Os solos localizados no terço inferior da topossequência apresentaram maior potencial agrícola, refletido por teores elevados de Ca, Mg e matéria orgânica, frequentemente superiores aos valores críticos ideais estabelecidos para fertilidade. Essa condição confere a esses solos uma fertilidade atípica e desbalanceada em relação aos demais solos da paisagem. A influência da posição na paisagem já foi destacada por Curi e Franzmeier (1984), que observaram aumento da fertilidade em topossequências de Latossolos no estado de Goiás, mesmo sob condições de intemperismo avançado, sugerindo que a variação topográfica exerce papel fundamental na redistribuição de nutrientes.

Portanto, os solos desse estudo contrastam significativamente com os de diversos estudos no QF, em que descreveram sistematicamente a predominância de solos desenvolvidos a partir de itabirito (Carvalho Filho; Curi; Shinzato, 2010; Costa *et al*., 2014; Coelho *et al*., 2017).

O fósforo (P) foi o único macronutriente que apresentou teores inferiores ao limite crítico, comportamento comumente observado em solos de regiões tropicais úmidas. Tal deficiência está associada à elevada capacidade de adsorção do P pelos constituintes minerais dos solos altamente intemperizados (Novais; Smyth, 1999), especialmente óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que reduzem a disponibilidade do elemento na solução do solo. Apesar de superiores aos valores registrados por Barreto *et al*. (2006) em pastagens não manejadas no sul da Bahia (0,14 mg dm^{-3}) e próximos aos encontrados por Skorupa *et al*. (2012) em remanescentes de Mata Atlântica (0,45 mg dm^{-3}), os teores observados ainda são baixos quando comparados a sistemas agroflorestais com café na Zona da Mata Mineira, onde Campanha *et al*. (2007) reportaram médias de 6,18 mg dm^{-3}. Além disso, conforme Mantovani *et al*. (2014), solos argilosos com P-Mehlich inferior a 75 mg dm^{-3} exigem adubação fosfatada para o cultivo de alface, que é uma das hortaliças mais produzidas na região do QF.

O B foi o único micronutriente identificado com teores abaixo dos níveis críticos, configurando uma limitação agronomicamente relevante. Concentrações tão reduzidas exigem aplicações relativamente elevadas de fertilizantes para suprir as necessidades das culturas. Considerando que a maioria dos demais micronutrientes apresenta teores excessivamente elevados, a desproporção entre os elementos pode acentuar desequilíbrios nutricionais, tornando necessária uma adubação com B em doses mais elevadas e criteriosamente manejadas para garantir um suprimento adequado sem comprometer a absorção relativa de outros micronutrientes e sem causar fitotoxidez por excesso.

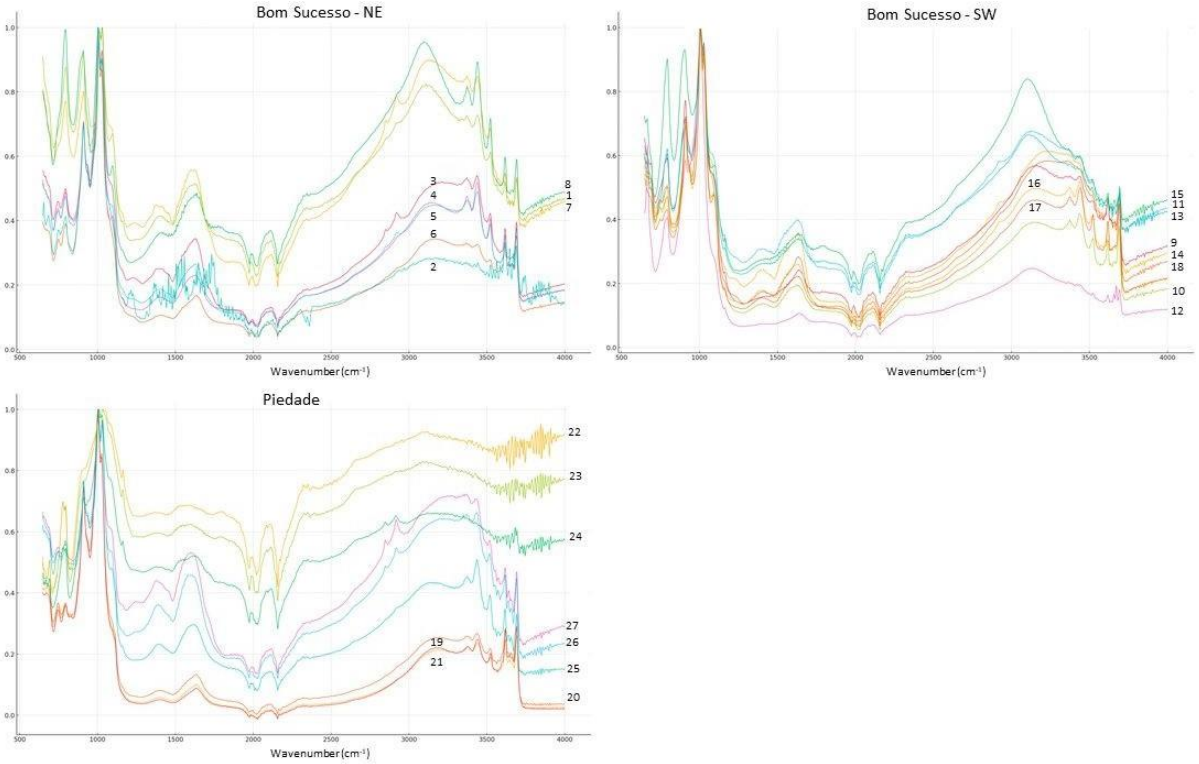
No terço inferior de Bom Sucesso - SW, os teores de Mn ultrapassaram em mais de 1000 % o nível crítico estabelecido para a fertilidade do solo (12 mg dm^{-3}), o que pode representar risco de fitotoxicidade. Contudo, a interação entre micronutrientes deve ser cuidadosamente considerada nesse contexto. Conforme destacado por Lucas e Knezek (1972), concentrações elevadas de Fe, Cu e Zn podem atenuar os efeitos tóxicos do Mn, limitando sua absorção pelas culturas. Em estudo conduzido por Nogueira e Cardoso (2002), teores de Mn superiores a 300 mg dm^{-3} foram tóxicos para a soja; entretanto, esse efeito foi suprimido quando as plantas foram inoculadas com fungos micorrízicos, resultando em maior tolerância

e crescimento. Não há ainda consenso definitivo quanto aos limites máximos permissíveis de Mn no solo para fins agrícolas.

Um pedoambiente com características semelhantes aos solos analisados neste estudo é encontrado na Serra dos Carajás, sudeste do Pará, onde a influência de cangas lateríticas resulta em altos teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Cr e Pb disponíveis. Apesar de sua importância ecológica e mineralógica, os estudos pedológicos na região ainda são escassos e pouco aprofundados (Schaefer *et al*., 2016). Esse cenário reforça a relevância de pesquisas como a presente, que contribuem para a compreensão das particularidades desses ambientes e fornecem subsídios técnicos para o manejo adequado da fertilidade em áreas sob forte influência geoquímica.

4.2 Espectroscopia de Infravermelho

Todos os perfis foram caracterizados por espectroscopia de infravermelho com transformação de Fourier por transmissão (T-FTIR) para separação das frequências de absorção individuais (figura 6)



Fonte: Autor

Figura 6: Espectros de infravermelho: 6, 7, 8 (Bom Sucesso A, Bi, Bc - Superior); 3, 4, 5 (Bom Sucesso A1, A2, Bi - Médio); 1, 2 (Bom Sucesso A, B - Inferior); 17, 18, 16 (Bom Sucesso A. B, Bw- Superior); 13, 14, 15 (Bom Sucesso A. B, Bw- Médio); 9, 10, 11, 12 (Bom Sucesso A1. A2, B, Bw- Inferior); 25, 26, 27 (Piedade A, C1, C2 - Superior); 22, 23, 24 (Piedade A, Ac, Bwc - Médio); 20, 19, 21 (Piedade A1, A2, Bw – Inferior).

Os espectros analisados apresentaram uma tendência semelhante (Figura 6), com sinais intensos e comparáveis aos espectros de diversos compostos orgânicos gerados por Higashikawa *et al*. (2014). Foram identificados picos agudos e intensos de absorção entre ~1100-1000 cm^{-1}, atribuídos a compostos inorgânicos simples e silicatos. Próximo a essa faixa (748-738 cm^{-1}), picos de menor intensidade sugerem ressonâncias (C-H) sobrepostas de carbonos 2, 3 e 5 na estrutura piranosídicas de celulose e hemiceluloses (Aguiar *et al*., 2013), compatíveis com a matéria orgânica do solo de ambientes florestais. Além disso, picos agudos com leve deformação (2019-1650 cm^{-1}) indicam anéis aromáticos, típicos de huminas, que podem estar associadas a minerais do solo (Primo *et al*., 2011). Outros picos intermediários, de ombreiras largas, na região de (~3160-3430 cm^{-1}) sugerem grupos funcionais de aminas (N-H), compatíveis com ácidos fúlvicos, embora com intensidade muito menor quando comparados com sua fração isolada (Gomes, 2011). Adicionalmente, foram identificados picos agudos na região de 3694 – 3616 cm^{-1} associados a grupos OH livres.

Devido à complexidade dos espectros, caracterizados por um grande número de picos, alongamentos e sobreposições, a interpretação das áreas espectrais torna-se desafiadora. No entanto, a Tabela 7 abaixo fornece uma visão geral clara das principais áreas calculadas das bandas a partir de uma linha de base gerada por estatística gaussiana flexível (às regiões de pico dominantes, para diminuição dos seus efeitos).

Tabela 7: Área dos principais picos de infravermelho

	Solo	Hor.	Prof. (cm)	Comprimento de onda cm^{-1}					
				3700–3600	**3400-3000**	**2900–1600**	**1400–1300**	**1100–1000**	**900–430**
				O–H	**N-H**	**C–H, COOH**	**CH2**	**Si–O, Al–O**	**Fe–O**
				Argilas, água	**Aminas**	**Matéria orgânica**	**Cadeia Alifática longa**	**silicatos, argilas**	**minerais de argila* Oxidos de ferro**
Bom Sucesso - NE	terço	A	0-3	1,09	1,9	5,69	1,8	14,82	2,8
	superior	Bi	3-33	0,46	3,46	2,93	0,38	4,1	2,3
	P1	BC	33-50+	0,87	12,21	3,34	0,16	7,17	3,1
	terço	A1	0-15	1,19	2,23	7,51	2,06	12,59	2,1
	médio	A2	15-32	1,38	4,01	5,32	1,81	11,59	1,96
	P2	Bi	32-73r	1,71	3,78	6,81	1,71	12,79	2,07
	terço	A	0-11	1,1	6,35	6,75	1,67	8,05	2,35
	inferior	B	11-60r	1,95	5,47	4,87	1,17	15,84	2,8
	P3								
Bom Sucesso - SW	terço	A	0-20	1,9	2,73	5,87	1,18	12,2	2,05
	superior	B	20-49	1,13	2,23	4,55	0,57	9,2	1,36
	P4	Bw	49-85+	1,02	2,1	3,81	0,47	8,9	2,04
	terço	A	0-25	0,7	3,34	4,72	0,63	8,3	2,03
	médio	B	25-65	0,85	4,33	3,83	0,29	9,84	1,69
	P5	Bw	65-110+	0,69	11,02	3,2	0,19	7,85	4,01
	Terço	A1	0-20	0,8	12,08	5,9	1,16	10,27	1,41
	inferior	A2	20-45	0,86	12,05	6,01	1,07	12,1	1,64
	P6	B	45-75	0,68	2,86	1,22	0,01	6,7	1,49
		Bw	75-110+	0,7	4,21	1,18	0,02	10,95	2,78
Piedade	terço	A	0-13	0,36	0,3	1,8	0,31	5,17	1,84
	superior	C1	13-30	0	0,2	1	0,1	4,67	1,53
	P7	C2	30-30+	0	0,2	0,81	0,1	3,87	1,35
	terço	A	0-20	0,98	3,31	8,86	2,65	15,02	1,77
	médio	Ac	20-40	1,13	3	8,19	2,28	14	1,78
	P8	Bwc	40-60+	1,27	4,24	3,03	1,32	13,16	2,4
	terço	A1	0-30	2,13	3,54	2,29	0,41	12,19	1,12
	inferior	A2	30-50	2,19	3,53	2,04	0,38	12,01	1,12
	P9	Bw	50-85+	2,5	3,8	2,03	0,36	12,2	1,15

*como caulinita e esmectita

Fonte: Autor

Observou-se uma tendência clara de aumento na área dos picos espectrais associados a óxidos de ferro com o aumento da profundidade dos perfis. O terço inferior da Serra da Piedade apresentou, de forma consistente, os menores valores de absorbância nessas faixas, o que está em concordância com os seus menos teores de óxidos de ferro totais, conforme descrito nas

Tabelas 7 e 8. Por outro lado, as bandas espectrais atribuídas à MOS apresentaram redução progressiva com o aumento da profundidade. O terço médio da Serra da Piedade foi o que mostrou os maiores picos nessas regiões e esse resultado foi consistente com os dados de carbono total obtidos por análise química (Tabela 4).

Uma eventual mudança no uso da terra, como exploração agrícola, poderia acelerar a degradação da MOS. Com esta redução, minerais como os óxidos de Fe e determinadas argilas de baixa atividade, passariam a exercer papel ainda mais relevante na retenção de nutrientes e na estruturação dos solos. Na prática, haveria uma perda generalizada de qualidade do solo, com destaque negativo para as regiões originalmente mais férteis, que seriam mais impactadas pela degradação da MOS.

A razão espectral entre compostos inertes (faixa de 400–1100 cm^{-1}) e grupos funcionais associados à fertilidade do solo (faixa de 1300–3700 cm^{-1}) mostrou-se promissora como um índice complementar de avaliação espectral da qualidade do solo. Esse índice foi calculado como: (absorbância média na faixa de compostos inertes) ÷ (absorbância total nas faixas de compostos inertes + funcionais). Os resultados indicaram um comportamento coerente com os padrões gerais de fertilidade: os solos localizados no topo da Serra da Piedade apresentaram a maior proporção relativa de compostos inertes, sugerindo maior predominância de minerais estruturais e menor presença de compostos orgânicos. Por outro lado, os solos do terço inferior da mesma serra exibiram as menores proporções de materiais inertes, refletindo maior contribuição de matéria orgânica ativa e compostos funcionais. No entanto, apesar da tendência geral capturada por esse índice, ele não foi sensível o suficiente para discriminar com precisão o solo mais fértil entre os avaliados, destacando-se como uma ferramenta útil para triagem espectral, mas não substitutiva de indicadores químicos diretos.

4.3 Composição química total

A análise de fluorescência semi-quantitativa de raios-X (XRF) foi capaz de determinar em média 87,5 % da massa total das amostras, expressa na forma de óxido, com valores de recuperação mais eficientes para amostras de rocha (média 93 %), por possuírem menores teores de elementos leves, como C, O, H, N. Os horizontes mais superficiais, mais ricos em MOS, apresentaram os menores valores de recuperação (Tabela 8).

Tabela 8: Composição geoquímica do solo e fragmentos de rocha, por fluorescência semiquantitativa de raios-X

	Solo	Hor	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	MnO	P_2O_5	SO_3	CaO	Na_2O	ZrO_2	Zr/Ti	Recuperação
								dag kg^{-1}							*100	%
Bom Sucesso - NE	terço	A	40,39	30,38	12,35	0,99	0,33	0,24	0,22	0,2	0,19	0,12	0,06	0,01	3,0	85,6
	superior	Bi	65,21	15,21	9,39	0,03	0,2	0,05	0,07	0,34	0,11	0,04	0	0,009	4,5	90,7
	P1	BC	68,96	15,68	9,09	0,02	0,13	0,05	0,06	0,29	0,08	0,02	0	0,008	6,2	94,4
		ROCHA	81,32	8,47	5,18	0,01	0,04	0,13	0,05	0,24	0,04	0,02	0	0,007	17,5	95,5
	terço	A1	44,96	23,67	10,93	0,24	0,22	0,14	0,19	0,25	0,26	0,33	0	0,006	2,7	81,2
	médio	A2	48,31	25,19	12,1	0,22	0,26	0,09	0,12	0,25	0,16	0,03	0	0,007	2,7	86,8
	P2	Bi	49,96	22,41	12,54	0,23	0,27	0,08	0,11	0,22	0,11	0	0	0,008	3,0	86
		ROCHA	68,35	17,39	5,15	0,01	0,04	0	0,13	0,2	0,06	0,02	0	0	0,0	91,4
	terço	A	63,63	14,47	8,74	0,05	0,18	0,08	0,14	0,41	0,2	0,3	0	0,008	4,4	88,2
	inferior	B	40,66	30,6	12,21	0,97	0,32	0,26	0,23	0,2	0,12	0,03	0	0,01	3,1	85,6
	P3	ROCHA	67,52	14,72	9,59	0,02	0,05	0	0,07	0,3	0,07	0,02	0	0,004	8,0	92,5
Bom Sucesso - SW	terço	A	43,81	23,34	10,42	0,06	1,36	0,08	0,18	0,21	0,13	0,05	0	0,01	0,7	79,7
	superior	B	44,19	24,3	11,45	0,06	1,39	0,07	0,15	0,22	0,1	0,02	0	0,01	0,7	82
	P4	Bw	44,37	26,11	11,81	0,06	1,36	0,06	0,13	0,22	0,08	0	0	0,01	0,7	84,3
		ROCHA	44,41	51,41	2,73	0,02	0,08	0,07	0,25	0,2	0,04	0,03	0	0	0,0	99,3
	terço	A	58,57	25,06	5,27	0,04	0,22	0,76	0,51	0,28	0,18	0,08	0	0,003	1,4	91
	médio	B	60,49	22,71	5,83	0,02	0,21	0,8	0,32	0,24	0,06	0,02	0	0,006	2,9	90,8
	P5	Bw	59,88	25,87	5,29	0	0,22	0,78	0,12	0,2	0,03	0,01	0	0,003	1,4	92,4
		ROCHA	31,29	53,37	4,23	0,02	0,05	0,1	0,79	0,19	0	0	0	0	0,0	90,2
	terço	A1	41,21	25,14	8,43	0,12	0,9	0,3	1,79	0,27	0,33	1,74	0	0,01	1,1	80,4
	inferior	A2	44,33	27,83	9,52	0,09	0,9	0,19	1,86	0,2	0,17	0,51	0	0,01	1,1	85,8
	P6	B	48,58	28	8,86	0,04	0,84	0,09	0,98	0,13	0,06	0,05	0	0,01	1,2	87,8
		Bw	40,87	36,19	5,23	0,03	0,38	0,5	1,11	0,12	0,04	0,03	0	0,004	1,2	85,7
		ROCHA	39,59	50,67	1,76	0,09	0,11	0,13	3,92	0,22	0	0,03	0	0	0,0	96,5
Piedade	terço	A	48,25	33,53	1,18	0,02	0,16	0,09	0,01	0,19	0,07	0,03	0	0,003	1,9	83,5
	superior	C1	50,4	35,37	0,42	0	0,12	0	0,01	0,26	0,03	0,02	0	0	0,0	86,6
	P7	C2	44,84	40,48	0,27	0	0,07	0,04	0	0,17	0,01	0,01	0	0	0,0	85,9
		ROCHA	63,86	26,73	0,94	0	0,15	0	0,07	0,48	0,04	0,04	0	0	0,0	92,4
	terço	A	51,69	15,5	13,5	0,2	0,57	0,13	0,05	0,28	0,33	0,09	0	0,01	1,8	82,4
	médio	Ac	53,76	16,93	16,79	0,16	0,59	0,05	0,03	0,19	0,19	0,02	0	0,01	1,7	88,9
	P8	Bwc	54,55	19,25	15,55	0,18	0,57	0,07	0,02	0,26	0,12	0,01	0	0,02	3,5	90,6
		ROCHA	66,95	6,79	6,22	0,2	0,36	0	0,03	0,45	0,14	0	0	0,01	2,8	81,2
	terço	A1	22,7	27,6	20,94	1,23	1,95	0,23	0,08	0,27	0,13	0,2	0,07	0,05	2,6	75,7
	inferior	A2	23,56	28,29	21,19	1,13	1,98	0,21	0,06	0,28	0,08	0,07	0,06	0,05	2,5	77,2
	P9	Bw	23,36	27,62	22,51	1,11	1,88	0,24	0,06	0,25	0,1	0,05	0,08	0,05	2,7	77,5
		ROCHA	23,49	74,57	0,79	0	0,05	0,1	0	0,18	0	0,08	0	0	0,0	99,3

Fonte: autor

Os fragmentos de rochas apresentaram variações significativas nos teores de Fe_2O_3, variando de 81 % no terço superior da topossequência NE do Bom Sucesso a 23 % no terço inferior da Serra da Piedade. Apesar dessas variações, todas as rochas podem ser classificadas como itabiritos, que requerem um mínimo de 15 % de Fe_2O_3 (Uhlein; Noce, 2012). Os menores teores de Fe_2O_3 em algumas formações podem ser atribuídos à presença de estratos mais concentrados em sílica ou alumina, como observado em filitos com hematita, que têm composição mineral semelhante, mas menores teores de Fe_2O_3 (Chaves; Knauer, 2020).

Os teores de sílica também foram altamente variáveis nas rochas, oscilando entre 6% e 74%, e juntamente com os teores de Fe_2O_3, representam a maior parte da composição da rocha. Os teores de Al_2O_3 foram consistentemente baixos, nunca excedendo 10 %, e em duas rochas foram inferiores a 1 %. Essa pobreza em Al também foi observada em itabiritos por Sanches *et al*. (2022) e pode explicar parcialmente as baixas concentrações de Al trocável nos solos (Tabelas 5 e 7). Por fim, outros componentes nunca ultrapassaram 1 % da massa total da amostra, com exceção notável de quase 4 % de MnO no Latossolo do terço inferior de Bom Sucesso (SW). É relevante destacar que a rocha originária desse solo também apresentou os maiores teores de MgO e K_2O, resultando no solo mais fértil da área estudada (Tabelas 5 e 7).

Os teores de P_2O_5 nas rochas foram significativamente superiores aos de CaO, sugerindo que, se minerais de fosfato estiverem presentes, as espécies predominantes são provavelmente fosfatos de Fe, Mn e Mg, em vez de apatitas. Alternativamente, é possível que o P ocorra principalmente sorvido nos óxidos de Fe herdados da rocha. As variações observadas sugerem variações significativas na composição química do itabirito, possivelmente relacionadas à formação de variações mineralógicas, como o itabirito dolomítico (Rosière; Chemale Jr., 2000), ou filito, indicando uma complexidade litológica.

Em relação à composição química dos solos, todos, exceto um pedon, apresentaram horizontes com teores de Fe_2O_3 >40 % e três estavam acima de 60 %. Apenas o terço inferior da Serra da Piedade apresentou < 25% de Fe_2O_3. Esses números são consideravelmente altos em comparação com solos desenvolvidos a partir de outras rochas sob clima semelhante e em declives comparáveis, mas sobre outras litologias. Latossolos desenvolvidos a partir de rochas máficas apresentam teores de ca. 30% de Fe_2O_3, enquanto solos formados a partir de outras rochas não itabiríticas apresentam tipicamente <21% de Fe_2O_3 (Araujo *et al*., 2014).

No entanto, os mecanismos diferenciais envolvidos na gênese desses altos teores de Fe_2O_3 são talvez ainda mais relevantes. A acumulação residual de Fe foi o processo pelo qual talco-xistos com <20 % de Fe_2O_3 deram origem a solos muito mais ricos (40-69%) em Fe_2O_3, sob clima tropical úmido (Vilela; Inda; Zinn, 2019). No entanto, no presente trabalho, os

maiores teores de Fe_2O_3 do solo foram atingidos, por perdas relativas de Fe após o intemperismo de rochas muito mais ricas em Fe. Os dados da Tabela 8 mostram que, surpreendentemente, os teores de Fe_2O_3 do solo foram de algum modo inversamente correlacionados com os teores de Fe_2O_3 da rocha: em cinco dos nove solos, os fragmentos de rocha tinham >60 % de Fe_2O_3 e os respectivos solos eram relativamente empobrecidos em Fe; em dois locais onde as rochas tinham <40 % de Fe_2O_3, seus solos passaram por enriquecimento relativo de Fe. Nenhuma mudança nos teores relativos de Fe_2O_3 com a pedogênese parece ocorrer no único pedon onde os teores de Fe_2O_3 na rocha estavam entre ca. 40 e 60 %, embora também não tenha havido diferenças nos teores de Fe_2O_3 no solo associados à única rocha com teores de Fe_2O_3 <25 %.

As consequências mais imediatas dos altos teores de Fe_2O_3 mostrados aqui foram as densidades muito altas de partículas do solo (Tabela 3). No entanto, embora nossos dados se refiram apenas a rochas de itabirito e solos derivados, a co-interpretação com dados de Vilela, Inda e Zinn (2019) sugere que pode haver um teor máximo empírico de Fe_2O_3 de ca. 70 %, que um solo pode atingir por acumulação residual ou perdas relativas da rocha, ou uma combinação dos dois mecanismos.

A evolução dos teores de sílica no solo, seguiu uma tendência oposta: enriquecimento relativo em solos onde os teores de Fe_2O_3 diminuíram na pedogênese, em comparação com a rocha, e vice-versa, ou seja, perdas relativas de sílica em solos em que o teor de Fe_2O_3 aumentou, em relação à rocha. A exceção foram as perdas relativas de sílica em dois Latossolos onde os teores de Fe_2O_3 em solos e rochas permaneceram os mesmos. Assim como para o Fe, as maiores perdas relativas de sílica ocorreram quando a rocha tinha altos teores de sílica, neste caso > ca. 50%.

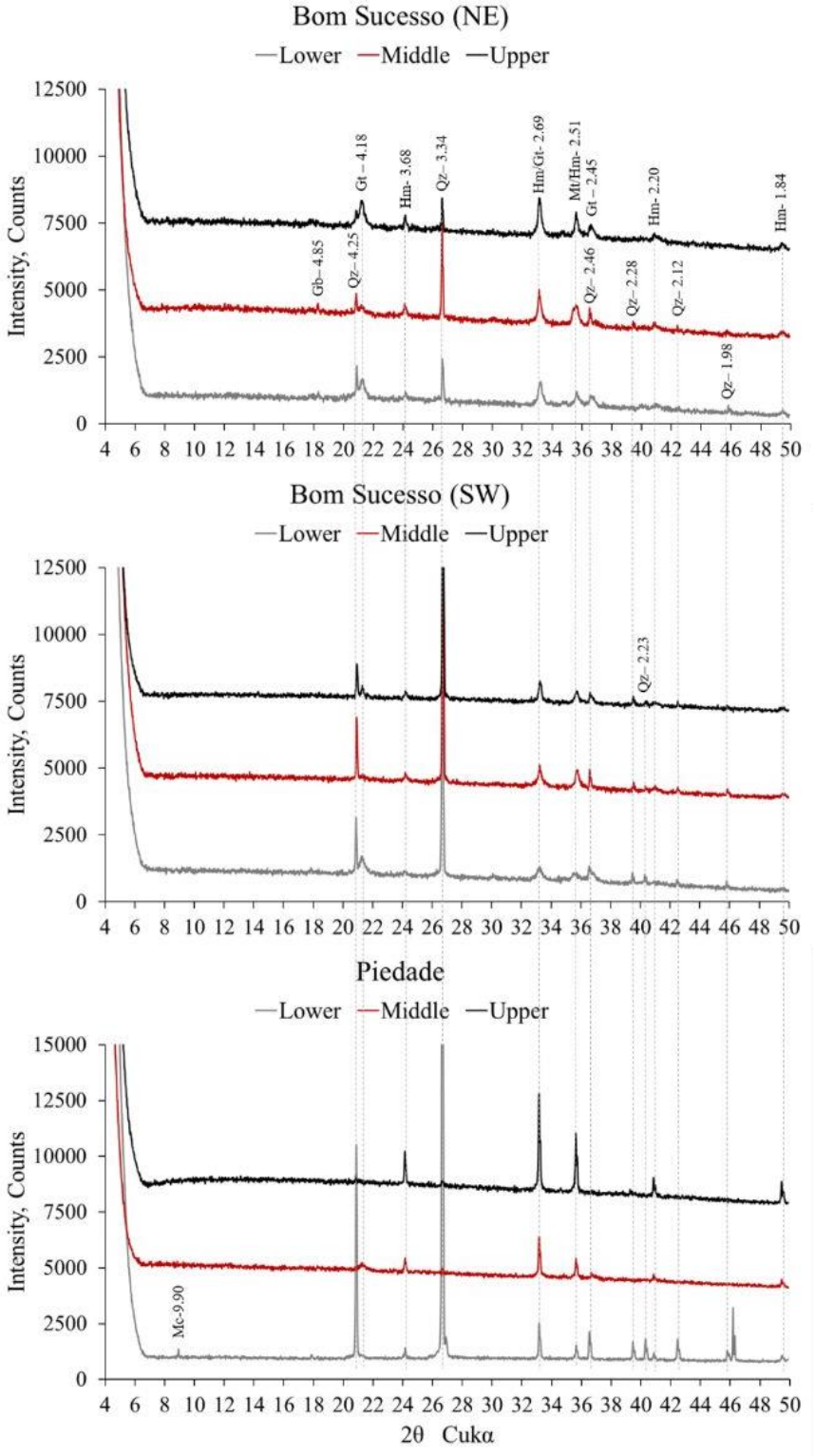
Os teores de Al_2O_3 sempre aumentaram nos solos em comparação com as respectivas rochas, o que também ocorreu para TiO_2 e ZrO_2, uma tendência esperada, pois estes são considerados elementos altamente imóveis. No entanto, é notável que em muitos pedons, os conteúdos de alguns componentes solúveis, notavelmente Mg, Ca, S e K, também mostraram enriquecimento relativo em comparação com a rocha, o que só pode ser explicado pela retenção eficiente desses nutrientes na biomassa vegetal, serapilheira e sorvidos em sítios de troca orgânica e mineral do solo.

Os teores de P_2O_5 e o MnO do solo apresentaram tendências variáveis de enriquecimento ou empobrecimento, que aparentemente não se relacionaram com os conteúdos de sílica ou Fe nos materiais de origem ou solos.

4.4 Mineralogia

A difração de raios-X das amostras analisadas em pó (sem orientação) de itabirito em todos os perfis, revelou picos significativos de quartzo, hematita e goethita, além da presença de magnetita e mica (Figura 7). A presença da goethita se deu provavelmente devido ao intemperismo dos óxidos de Fe primários. Resultados semelhantes foram mostrados por Gonçalves (2020) em itabiritos da mesma região.

A difração de raios-X das amostras analisadas em pó (sem orientação) de itabirito em todos os perfis, revelou picos significativos de quartzo, hematita e goethita, além da presença de magnetita e mica (Figura 8). A presença da goethita se deu provavelmente devido ao intemperismo dos óxidos de Fe primários. Resultados semelhantes foram mostrados por Gonçalves (2020) em itabiritos da mesma região.

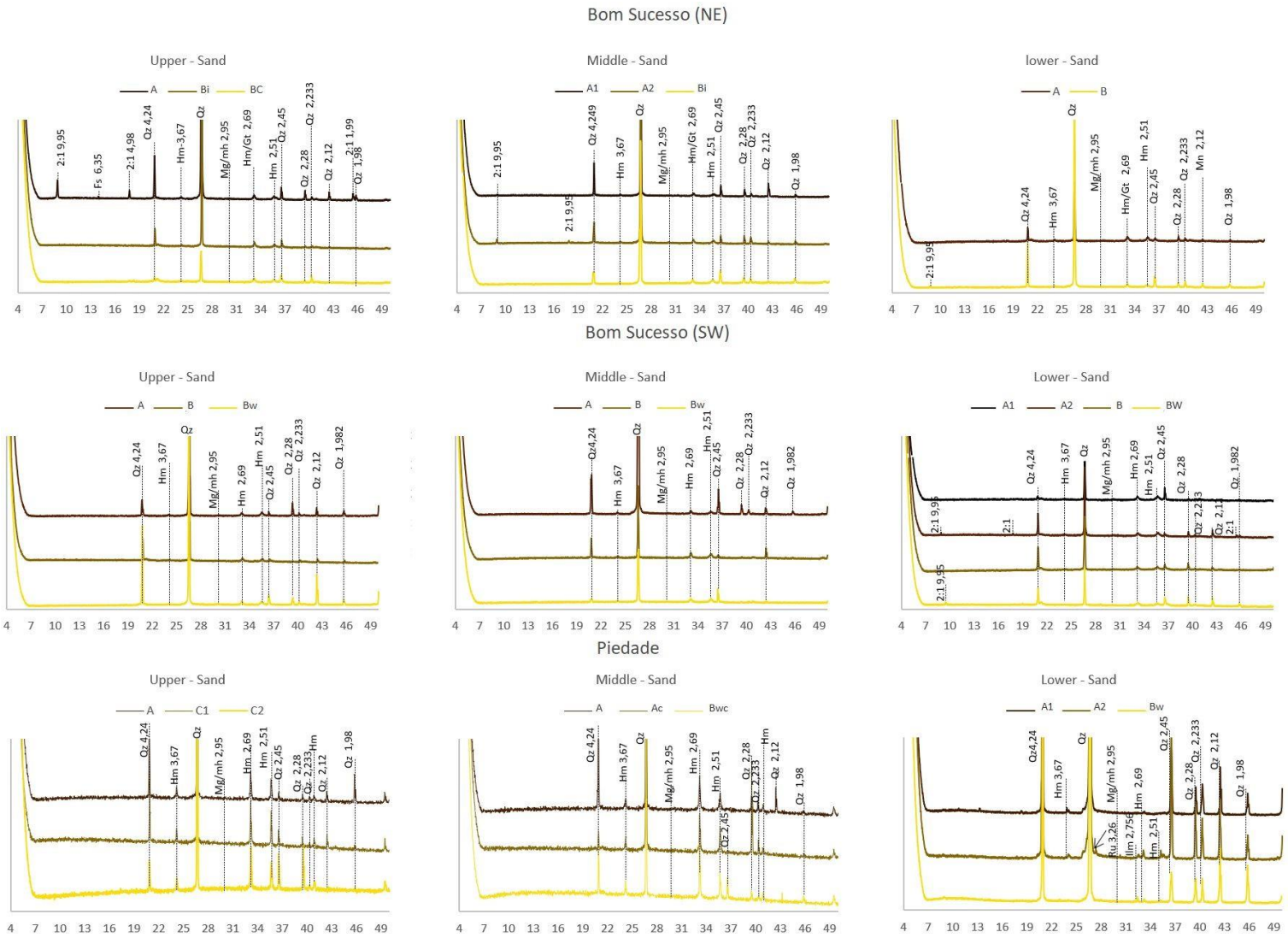


Fonte: Autor

Figura 7: Difração de raios-X de amostras de rocha. Gb: Gibbsita; Qz: Quartzo; Hm: Hematita; Gt: Goethita; Mt: Magnetita; Mc: Mica; Upper: terço superior; Middle: terço médio; Lower: terço inferior. Espaçamento d = Å.

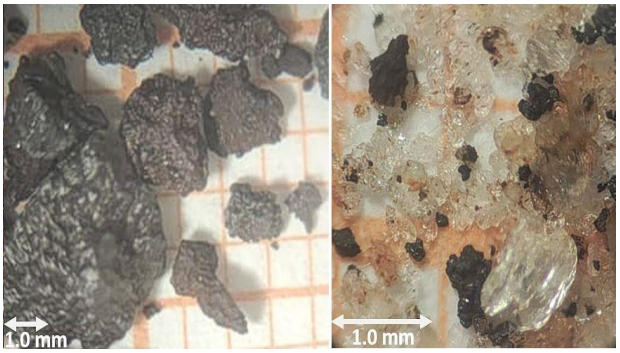
No entanto, houve variação relativa entre topossequências, uma vez que em Bom Sucesso NE, os picos de quartzo foram semelhantes em altura aos da hematita, provavelmente refletindo os teores menores de sílica em relação ao Fe_2O_3 (Tabela 8). Alternativamente, picos de quartzo menores ou mesmo quase ausentes também podem ser atribuídos à predominância de formas de sílica amorfa ou criptocristalina, como cherts, também um componente comum de itabiritos, como em duas rochas da Serra da Piedade. No terço inferior em Piedade, um pico de mica de 9,90 Å foi evidente, o que não ocorreu em rochas de outros pedons.

A fração areia dos solos apresentou picos principais de quartzo e hematita, semelhantes às amostras de rocha, com presença pontual de feldspato, goethita, ilmenita e rutilo (Figura 8). As amostras com altas concentrações de hematita são evidenciadas pela coloração acinzentada das areias (figura 9). Observaram-se também picos intermediários de goethita, associados à hematita em todos os perfis.



Fonte: Autor

Figura 8: Difração de raios-X das amostras da fração areia. Fs: feldspato; Qz: Quartzo; Hm: Hematita; Gt: Goethita; Mg: Magnetita; Mh: maghemita; 2:1: argilominerais com camadas 2:1; ilm: Ilmenita; Ru: rutilo; Upper: terço superior; Middle: terço médio; Lower: terço inferior.



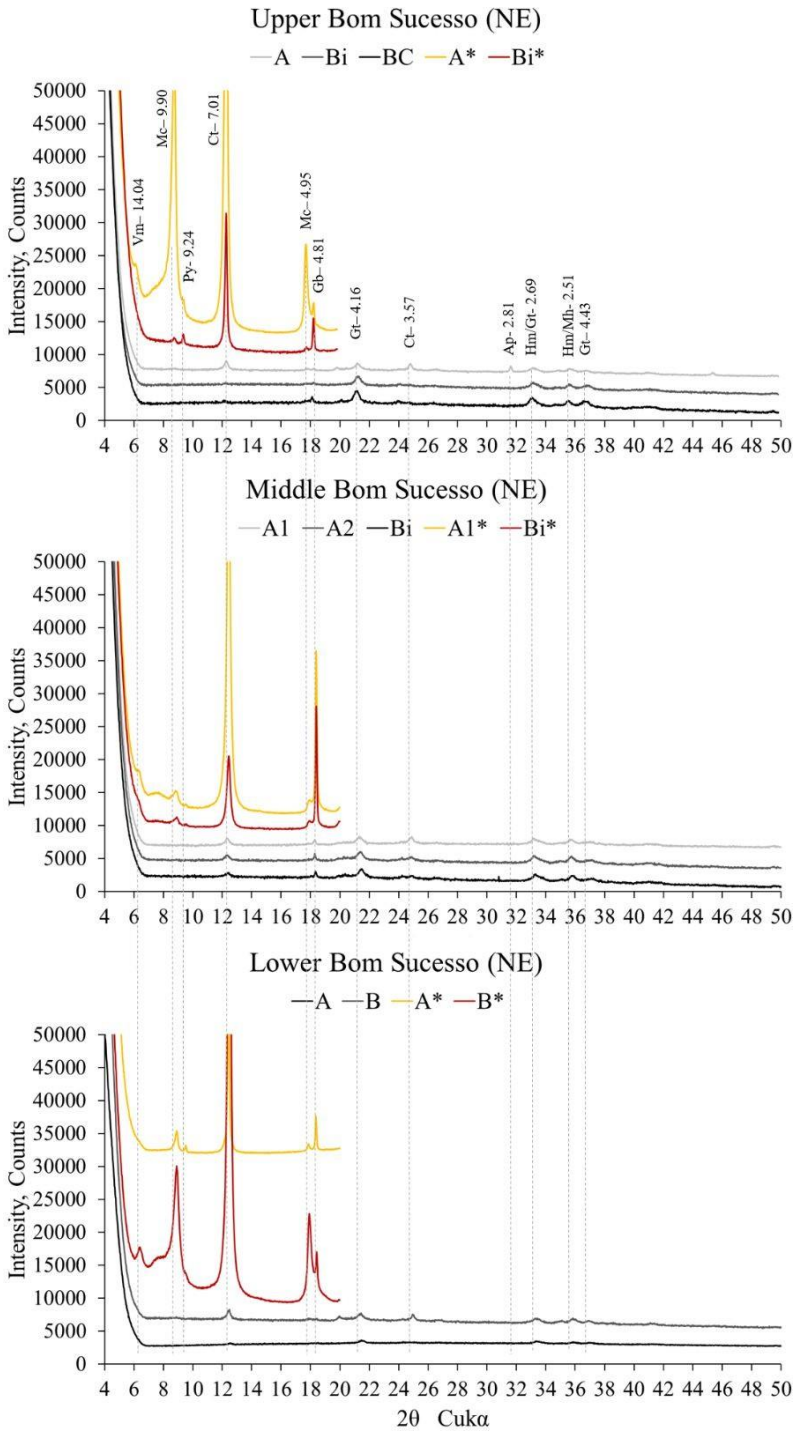
Fonte: Autor

Figura 9: Fração areia dos solos, sob lupa. À esquerda (Piedade, Superior): Altos teor de Fe e densidade de partículas. À direita (Bom Sucesso – NE, Inferior): alto teor de quartzo e baixa densidade de partículas.

Em todos os três solos da Serra Bom Sucesso NE, picos de muita baixa intensidade de 10 Å de mica ocorreram em pelo menos um horizonte, bem como no pedon do terço inferior de Bom Sucesso SW, onde também apareceu na amostra de rocha. Pequenos picos de feldspatos ocorreram no terço superior de Bom Sucesso NE, e também no terço inferior da Serra Piedade. Este último foi o único pedon onde picos de óxidos de Ti (rutilo - TiO_2 e ilmenita - $FeTiO_3$) foram identificados, consistentemente com as maiores concentrações de Ti de todos os solos (Tabela 7). Picos muito pequenos de 2,95 Å, indicativos de magnetita, ocorreram nas areias de ambos os solos da camada inferior da Serra Bom Sucesso.

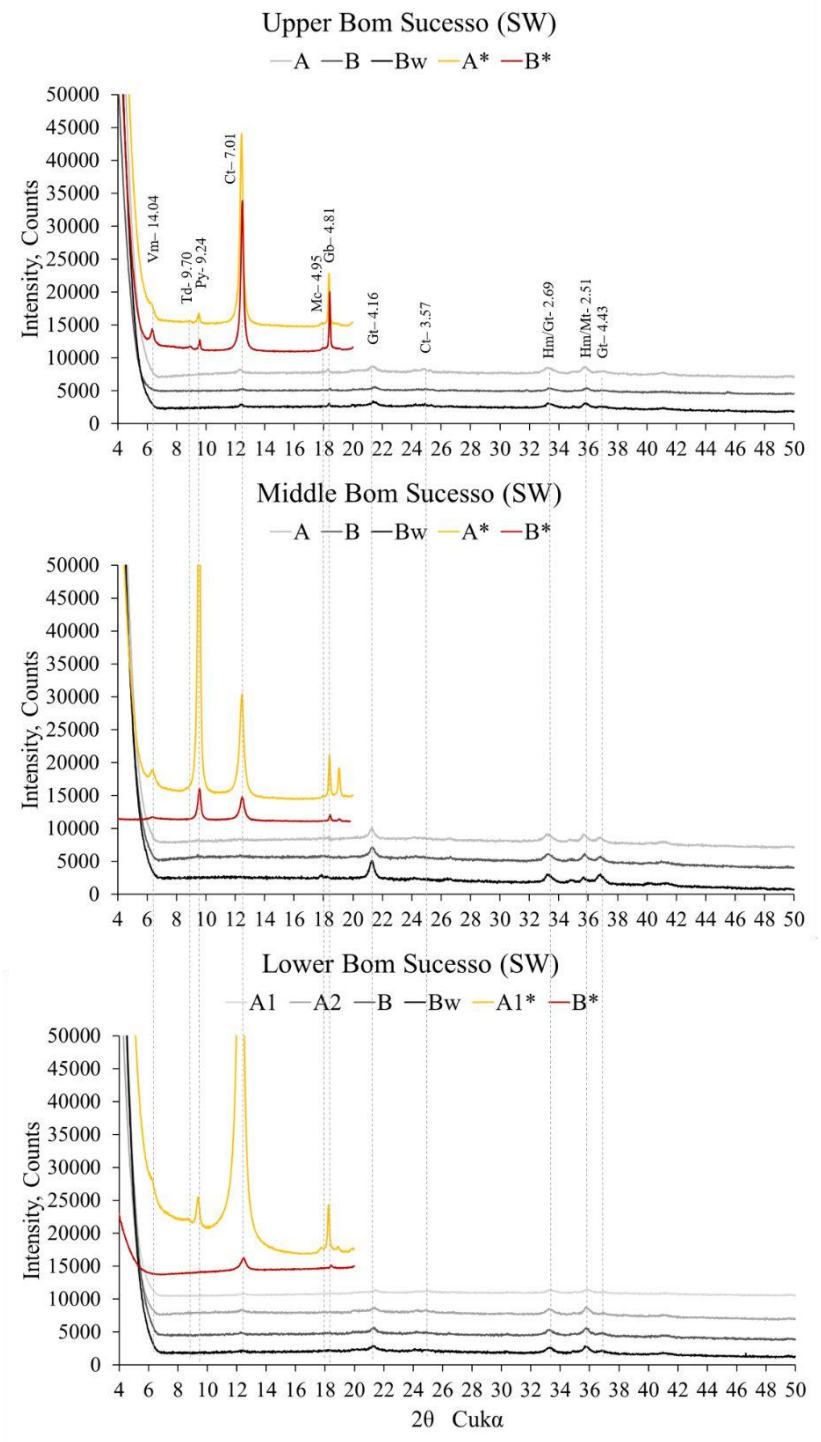
A presença em alguns solos de minerais do tipo 2:1 em subsuperfície, onde o intemperismo, em tese, é menos avançado, provavelmente se deu em razão da presença de mica no itabirito ou da presença parcial de outras rochas associadas ao mesmo, como mica-xisto. Em relação ao terço superior da Serra de Bom Sucesso, a presença desses minerais, bem como de feldspatos horizonte A, acredita-se ser resultado de uma deposição de material oriundo da parte mais alta da serra, ou talvez por ventos na estação seca.

A análise de difração de raios-X de amostras em pó e orientadas da fração argila (Figuras 10, 11 e 12) revelou a presença de caulinita, hematita, goethita e gibbsita em todos os solos, uma assembleia mineralógica típica de solos altamente intemperizados em climas tropicais úmidos, caracterizado por baixa retenção de cátions e CTC. Contudo, além desses minerais principais, foram observadas diferenças significativas na ocorrência e intensidade de outros minerais entre as topossequências, solos e horizontes, o que pode contribuir para explicar a variação na fertilidade dos solos.



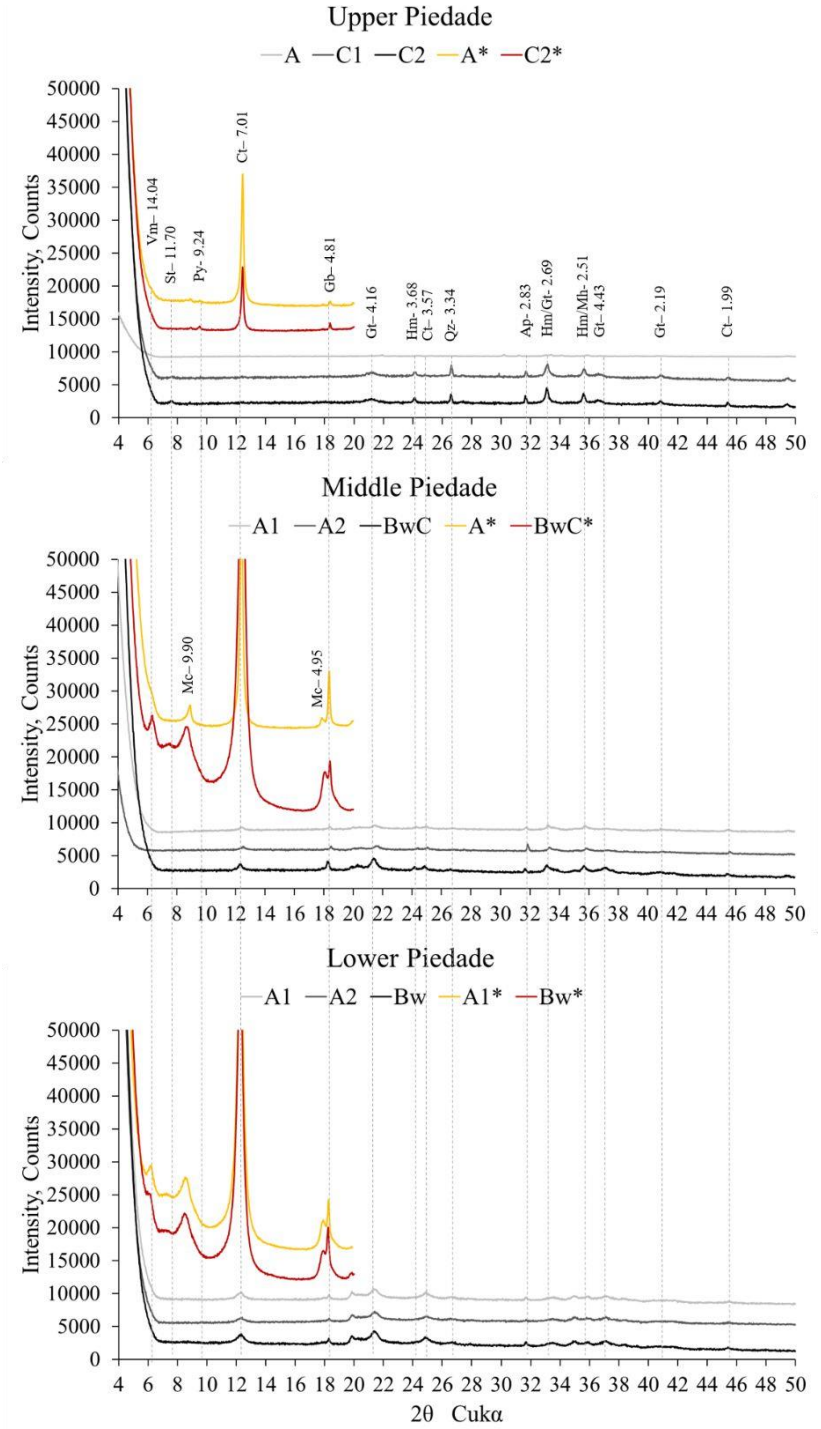
Fonte: Autor

Figura 10: Difração de raios-X de amostras de argila. Em que: Vm: vermiculita; Ct: Caulinita; Hm: Hematita; Gt: Goethita; Gb: Gibbsita; Mh: Maghemita; Mi: Mica; Py: pirofilita; Ap: apatita; (*): argila tratada com etilenoglicol. espaçamento d = Å. Upper: terço superior; Middle: terço médio; Lower: terço inferior.



Fonte: Autor

Figura 11: Difração de raios-X de amostras de argila. Em que: Vm: vermiculita; Ct: Caulinita; Hm: Hematita; Gt: Goethita; Gb: Gibbsita; Mh: Maghemita; Td: Todorokita; Mi: Mica; Py: pirofilita; (*): argila tratada com etilenoglicol. espaçamento d = Å. Upper: terço superior; Middle: terço médio; Lower: terço inferior.



Fonte: Autor

Figura 12: Difração de raios-X de amostras de argila. Em que: Vm: vermiculita; St: estilpnomelano; Ct: Caulinita; Hm: Hematita; Gt: Goethita; Gb: Gibbsita; Mh: Maghemita; Mi: Mica; Py: pirofilita; (*): argila tratada com etilenoglicol. espaçamento d = Å. Upper: terço superior; Middle: terço médio; Lower: terço inferior.

Com o objetivo de identificar minerais do grupo 2:1 nas frações argilosas, foram realizados tratamentos térmicos que resultaram em alterações na posição dos picos difratométricos na faixa de 10º e 15º 2θ, correspondentes aos minerais do tipo 2:1 e à caulinita, respectivamente (Apêndice C). O aquecimento promoveu o colapso dos picos adjacentes, o que, por efeito de adição, permitiu a intensificação dos picos resultantes. Observou-se que os picos atribuídos à caulinita permaneceram estáveis após tratamento a 350 °C, porém foram eliminados a 550 °C, evidenciando a degradação estrutural deste mineral (Gardolinski *et al*., 2003). Em contrapartida, os minerais 2:1 mantiveram alguns picos em ambas as temperaturas, comportamento esperado devido à maior estabilidade térmica destes argilominerais.

Após solvatação por etilenoglicol das argilas orientadas (figuras 10, 11 e 12 – difratogramas de 4 a 20º 2θ), picos moderados a muito intensos de micas e vermiculita foram evidentes em todos os solos, conforme observado anteriormente em um Luvissolo desenvolvido a partir de itabirito em outro local na Serra de Bom Sucesso (Araujo *et al*., 2014). As vermiculitas têm cargas superficiais consideráveis e, portanto, podem aumentar muito a retenção de cátions, principalmente K e NH_4^+ (Malla, 2002). Como as vermiculitas são abundantes nos solos estudados, elas devem estar diretamente envolvidas na retenção eficiente de nutrientes nos solos mais férteis. Embora nenhuma fração de argila tenha atingido formalmente o limite para serem consideradas de alta atividade (Tabela 5), em muitos casos elas se aproximaram desses valores nos horizontes B. Essas vermiculitas foram provavelmente formadas pela remoção de K e intemperismo pedogênico de micas e illitas de tamanho argila (Malla, 2002) herdadas da rocha itabirítica. De fato, os picos de mica não só apareceram em todas as argilas, mas foram muito intensos em alguns pedons, notavelmente na camada superior da topossequência NE de Bom Sucesso.

No entanto, a mineralogia da argila foi ainda mais complexa em algumas topossequências e solos, onde algumas espécies minerais incomuns foram detectadas. Na porção NE da Serra Bom Sucesso, picos de 9,24 Å também foram observados em todos os solos (Figura 10). Em um solo de itabirito próximo, tais picos foram anteriormente atribuídos à litioforita, um óxido de Mn, por Araujo *et al.* (2014). No entanto, os espectros de maior qualidade no presente trabalho permitem uma identificação mais adequada da pirofilita [$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$], um filossilicato dioctaédrico 2:1 e principal componente da agalmatolita ou pagodita, uma rocha mole extraída em muitas partes do QF e usada como pedra-sabão e na produção de cerâmica (Alecrim, 1982). A pirofilita se forma principalmente em sedimentos sujeitos a metamorfismo de baixo a médio grau (Sanchez-Camano; Forteza; Lorenzo, 1998),

mais tipicamente por silicificação de caulinitas e, portanto, deve ser considerada herdada da rocha itabirítica e não formada no solo. Considerando a abundância de Fe no itaribirto e seu ambiente, também é provável que ocorra a sua variação rica em Fe^{3+}, a ferripirofilita (Zelazny; Thomas; Lawrence, 2002). Embora a pirofilita seja facilmente confundida com talco, que tem uma carga similarmente baixa e que ocorre em afloramentos ultramáficos próximos à Serra de Bom Sucesso (Vilela; Inda; Zinn, 2019), é improvável que talco ocorra em solos do presente estudo. Isto porque os teores de MgO nesses solos são muito baixos (Tabela 7), e o talco é mais facilmente intemperizado do que a pirofilita (Zelazny; Thomas; Lawrence, 2002), talvez devido à maior solubilidade de Mg em comparação ao Al. Esses autores concordam que a pirofilita também é facilmente intemperizável e, portanto, raramente é relatada em solos, mas eles relatam que ela foi descrita em alguns Latossolos e Argissolos da Amazônia, talvez devido ao seu encapsulamento por óxidos de Fe. De fato, seções finas (Figuras 11 e 12) mostram domínios de pirofilita com um contorno escuro devido ao revestimento com argilas ricas em Fe, muito semelhantes aos fragmentos de talco encapsulados em Fe em uma área próxima (Vilela; Inda; Zinn, 2019). Na Serra da Piedade, a pirofilita é identificada por difração de raios-X como um pequeno pico discreto na argila do terço superior e como uma forte assimetria à direita perto dos picos de mica nos solos mais baixos (Figura 12). Embora este mineral tenha uma área superficial específica bastante alta, sua densidade de carga e capacidade de troca catiônica são relatadas como muito baixas (Zelazny; Thomas; Lawrence, 2002), sugerindo que os locais de carga permanente são esparsos e, portanto, não se espera que este mineral contribua para a fertilidade moderada a alta dos solos estudados. No entanto, provavelmente participa da retenção sortiva de cadeias alifáticas longas da matéria orgânica do solo, se ocorrer, dispersa entre a fração argila, em vez de agrupadas em domínios grandes.

Outra ocorrência inesperada foi o pico de 2,81 Å, atribuído à apatita, provavelmente fluorapatita, mais estável que a hidroxiapatita, em todos os solos da topossequência da Serra da Piedade (Figura 12). A rocha itabirítica nesses solos apresentou os maiores teores de P_2O_5 entre as três topossequências, embora os teores totais do solo fossem semelhantes aos dos outros (Tabela 8). Em solos, os minerais de fosfato são tipicamente escassos e pequenos em tamanho, com apatita tipicamente mais estável do que fosfatos de Al ou Fe (Harris, 2002), o que pode ajudar a explicar sua ocorrência em argilas desses solos. Embora os níveis de P de Mehlich-I nesses solos sejam baixos (Tabela 4), o que é consistente com altos teores de óxidos de Fe na argila, a estabilidade da fluorapatita pode sugerir sua potencial fonte futura de P para árvores florestais nativas. Um forte pico de apatita também apareceu em argilas do terço superior de Bom Sucesso NE.

Além disso, um pico de 9,7 Å atribuído à todoroquita ([Mn- (Na,Ca,K,Ba,Sr)1-x(Mn,Mg,Al)$_6$O$_{12}$·3-4H$_2$O] ocorreu em dois solos da topossequência Bom Sucesso SW, onde os teores de MnO foram notavelmente altos (Tabela 8).

Finalmente, o Neossolo do terço superior da Serra da Piedade apresentou um pequeno pico de 11,7 Å na argila sem orientação, mas não visível na lâmina orientada, que pode ser atribuído ao estilpnomelano fibroso, um filossilicato raro que pode ocorrer em formações ferríferas bandadas. O terço médio nesta topossequência também apresentou este pico que pode ser atribuído ao estilpnomelano laminar. A presença deste mineral foi raramente, ou nunca, relatada em argilas do solo, e uma vez que tem algumas semelhanças com a biotita, nomeadamente a presença de Fe^{2+} octaédrico, não se espera que seja resistente ao intemperismo, embora o encapsulamento em óxidos de Fe também possa desempenhar um papel na sua preservação no solo, à exemplo da pirofilita e talco.

4.5 Susceptibilidade magnética

Os valores de suscetibilidade magnética (χm) foram muito altos na maioria das amostras de rochas, como esperado para itabiritos (Tabela 9). Nas rochas, χm apresentou valores semelhantes em frequências altas e baixas, com χm dependente de frequência de ca. 2% ou menos, sugerindo a predominância de minerais ferrimagnéticos multidomínio, como magnetita e titanomagnetita (Preetz *et al*., 2017). Em todas as amostras de solo, χm excedeu 100 10^{-7} m^3 kg^{-1}, exceto para o terço inferior da Serra da Piedade, que também foi o único solo com χm dependente de frequência >10%. Em geral, solos tropicais úmidos em Minas Gerais excedem 100 10^{-7} m^3 kg^{-1} apenas como resultado do forte acúmulo residual de Fe após o intemperismo de rochas máficas, ultramáficas ou itabiríticas, mas não de rochas ácidas e outras rochas pobres em Fe (Araujo *et al*., 2014).

Os valores de χm para solos em massa relatados aqui são comparáveis à maioria dos solos derivados de talco estudados por Vilela *et al*. (2019), fortemente enriquecidos em Fe por acumulação residual, embora nossos valores mais altos ainda sejam metade dos valores mais extremos relatados por esses autores.

Os valores de χm para frações de argila também são altos, embora geralmente mais baixos do que para a terra fina, e mostraram valores de χm dependentes da frequência >10%, indicativos de maghemita superparamagnética ultrafina (γ-Fe_2O_3), formada durante a pedogênese. Esses resultados indicam que, na maioria dos solos, os valores de χm refletem a

contribuição combinada de minerais ferrimagnéticos remanescentes do material de origem e de óxidos de ferro formados durante a pedogênese. No Latossolo do terço inferior da Serra da Piedade, entretanto, a maior dependência de frequência sugere o predomínio de partículas superparamagnéticas de maghemita sobre magnetita primária.

Tabela 9: Susceptibilidade magnética para as frações terra fina seca ao ar, argila e fragmentos de rocha das Serra de Bom Sucesso e Piedade.

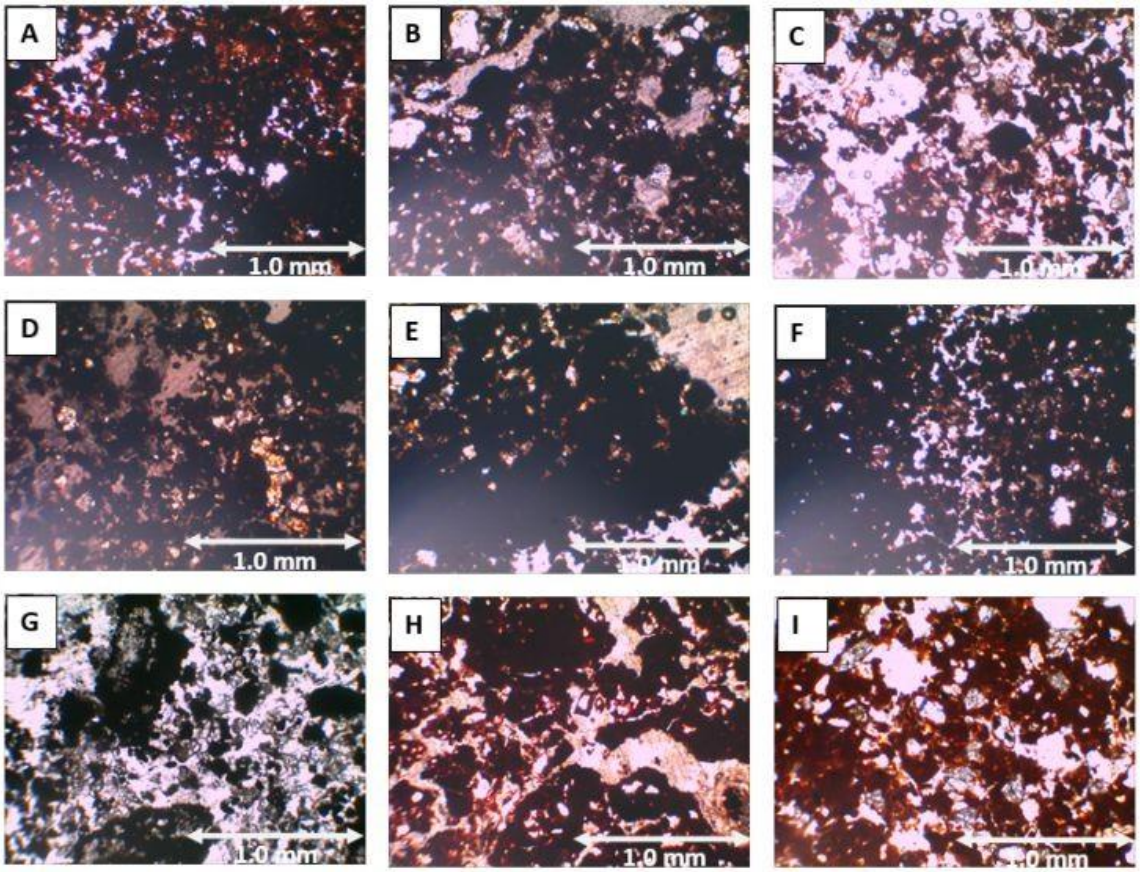
Solo		Hor	Susceptibilidade magnética					
			SOLO			ARGILA		
			χLF	χHF	Xfd	χLF	χHF	Xfd
			10^{-7} m^3 kg^{-1}		%	10^{-7} m^3 kg^{-1}		%
Bom Sucesso - NE	terço superior P1	A	351,8	343,1	2,5	190,9	171,1	10,4
		Bi	462,6	446,8	3,4	305,7	262,4	14,2
		BC	310,0	300,8	3,0	211,2	182,7	13,5
		Rocha	60,1	59,3	1,3			
	terço médio P2	A1	648,2	639,6	1,3	252,8	217,3	14,0
		A2	602,9	590,5	2,1	297,6	264,7	11,1
		Bi	699,3	689,6	1,4	263,8	235,1	10,9
		Rocha	874,7	874,5	0,0			
	terço inferior P3	A	466,2	451,3	3,2	252,0	217,3	13,8
		B	376,4	365,3	2,9	403,9	353,7	12,4
		Rocha	187,6	184,1	1,9			
Bom Sucesso - SW	terço superior P4	A	593,9	565,1	4,8	547,2	475,0	13,2
		B	598,8	570,5	4,7	462,5	404,1	12,6
		Bw	593,1	563,2	5,0	511,0	449,1	12,1
		Rocha	524,8	521,2	0,7			
	terço médio P5	A	498,6	487,2	2,3	91,0	77,9	14,4
		B	544,6	533,4	2,1	148,0	130,1	12,1
		Bw	338,0	335,0	0,9	50,6	44,5	12,1
		Rocha	364,1	361,7	0,7			
	terço inferior P6	A1	622,3	589,7	5,2	339,4	295,0	13,1
		A2	866,1	824,0	4,9	634,0	560,8	11,5
		B	823,7	783,7	4,9	922,1	820,7	11,0
		Bw	419,2	405,4	3,3	1061,9	949,0	10,6
		Rocha	593,0	589,1	0,7			
Piedade	terço superior P7	A	102,5	102,4	0,1	245,2	211,1	13,9
		C1	135,7	135,7	0,0	219,3	188,8	13,9
		C2	141,3	141,1	0,1	214,1	186,5	12,9
		Rocha	273,2	273,2	0,0			
	terço médio P8	A	209,0	206,1	1,4	345,3	301,1	12,8
		Ac	197,1	196,3	0,4	123,7	104,9	15,2
		Bwc	137,2	136,3	0,7	302,4	264,8	12,4
		Rocha	150,0	147,3	1,8			
	terço inferior P9	A1	42,4	37,5	11,6	63,6	54,7	14,0
		A2	47,2	41,8	11,4	60,6	52,4	13,5
		Bw	34,6	30,4	12,1	50,5	44,2	12,5
		Rocha	102,2	101,5	0,7			

Fonte: Autor

χLF: baixa frequência; χHF: alta frequência; χFD: dependência da frequência em relação à susceptibilidade magnética.

4.6 Micromorfologia

A investigação micromorfológica foi um tanto dificultada por uma micromassa majoritariamente opaca (Fig. 13, Tabela 10), que mesmo quando a seção fina foi desbastada a <30 μm, ainda impedia a visualização de tramas birrefringente na maioria dos solos. Tal opacidade é consistente com altas concentrações de óxidos de Fe primários e especialmente secundários, e também matéria orgânica, que não apenas escurecem a matriz do solo, mas a tornam isotrópica, ou seja, sem domínios paralelos visíveis de argilas silicatadas, em luz polarizada e mesmo planar.



Fonte: Autor

Figura 13 - Seções finas dos perfis. A. B e C - Bom Sucesso - NE. superior, médio e inferior, respectivamente; D. E e F - Bom Sucesso - SW. superior, médio e inferior, respectivamente; G. H. e I - Piedade. superior, médio e inferior, respectivamente. Todas as imagens são mostradas com luz polarizada parcialmente cruzada.

Tabela 10: Principais propriedades micromorfológicas dos solos.

Perfil	Distribuição Grossa/fina	Poros	Material fino/ trama birefringente	Microestrutura	Material grosseiro
Bom Sucesso - NE Terço superior	porfírica aberta	Poros de empacotamento equantes	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida densa a solta	Grãos irregulares de quartzo, muscovita e chert; opacos
Bom Sucesso - NE Terço médio	porfírica aberta	Poros de empacotamento, planares e canais	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida densa a solta	Grãos irregulares de quartzo, muscovita e chert; opacos
Bom Sucesso - NE Terço inferior	porfírica aberta	Poros de empacotamento equantes	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida	Grãos de quartzo irregulares, muscovita e chert; opacos, feldspatos metamorfisados, muscovita e pirofilita
Bom Sucesso - SW Terço superior	porfírica aberta	Poros de empacotamento planares	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida com tendência a bloco	Grãos irregulares de quartzo, muscovita e fragmentos grosseiros de rocha
Bom Sucesso - SW Terço médio	porfírica aberta	Poros de empacotamento, planares e canais de raizes	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida com tendência a bloco	Grãos irregulares de quartzo, muscovita e fragmentos grosseiros de rocha
Bom Sucesso - SW Terço inferior	porfírica aberta	Poros de empacotamento, planares e câmaras	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida	Grãos irregulares de quartzo, muscovita, chert; opacos; fragmentos de rocha grosseiros e nódulos de Fe
Piedade Terço superior	Enáulica	Poros de empacotamento	Indiferenciada, coloração preta	Granular esparsa	Grãos de quartzo irregulares, chert e material orgânico

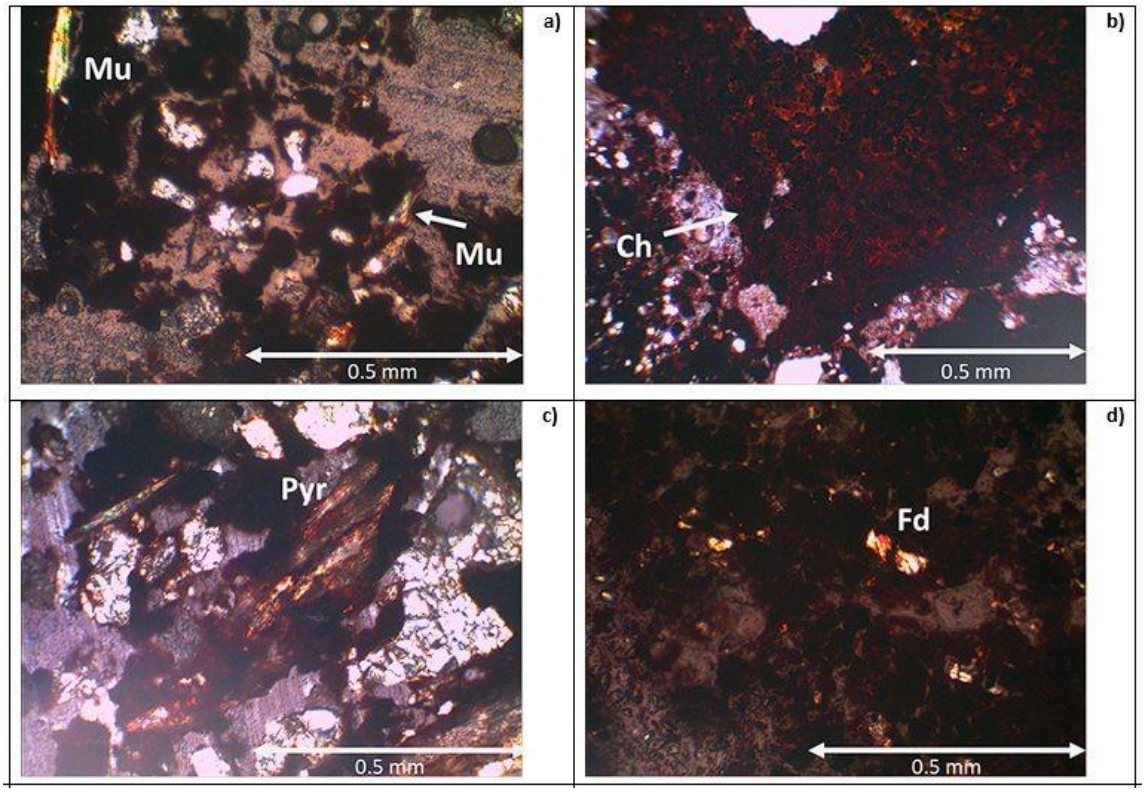
Piedade Terço médio	porfírica aberta	Poros de empacotamento	Indiferenciada, coloração vermelha escura a preta	Granular coalescida com tendência a massiva	Grãos irregulares de quartzo, muscovita, feldspatos metamorfisados e zircão.
Piedade Terço inferior	Porfírica de duplo espaço	Poros de empacotamento	granostriada	Granular coalescida com tendência a bloco	Grãos irregulares de quartzo e muscovita

Fonte: Autor

A maioria das seções finas mostra uma microestrutura do solo consistindo de grânulos finos escuros, frequentemente coalescendo para formar grandes *peds* que no campo eram tipicamente descritos como blocos subangulares. Esse padrão é comum em Latossolos onde os óxidos de Fe e Al predominam amplamente sobre a caulinita na fração argila. No entanto, algumas evidências importantes foram coletadas por meio do material grosseiro, que é considerado o mais informativo sobre o material parental do solo (Stoops, 2003).

Além de grãos opacos abundantes de óxidos de Fe, grãos angulares de quartzo foram encontrados em todas as seções finas, sugerindo pouco ou nenhum transporte e, portanto, apoiando a tese de uma pedogênese autóctone do material de origem subjacente em todos os solos. Muscovita, frequentemente grosseira e geralmente com altas cores de interferência, devido à sua resistência ao intemperismo, também era comum (Figuras 14 a, c). No entanto, alguns grãos grosseiros incomuns também estavam presentes em todos os solos, mais notavelmente fragmentos de quartzo microcristalino, frequentemente com cores avermelhadas (Figuras 14 a, d), como reportado em outro solo sobre itabirito da Serra de Bom Sucesso (Araujo *et al.*, 2014), mas também por sílica completamente amorfa e isotrópica. Domínios de pirofilita grosseira, com altas cores de interferência e revestidos por material fino escuro (Figura 14 c), foram observados na topossequência NE de Bom Sucesso, confirmando sua detecção por difração de raios-X da fração argila (Figuras 10, 11). Conforme previsto por Zelazny, Thomas e Lawrence (2002), tal encapsulamento por óxidos estáveis provavelmente atrasou a decomposição deste mineral propenso ao intemperismo, como observado também por Vilela, Inda e Zinn, (2019) para fragmentos de talco em solos ricos em óxido de Fe nas proximidades.

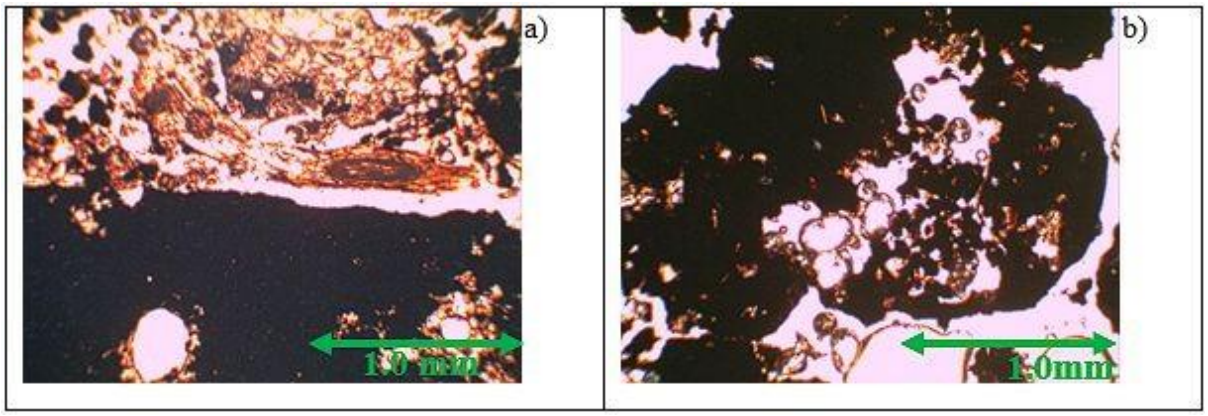
O único solo com um padrão micromorfológico diferente foi o Latossolo do terço inferior da Serra da Piedade, que apresentou uma matriz principalmente transparente, apresentando trama birrefringente granostriada, consistentes com um padrão de estrutura em blocos. Este solo também apresentou grãos de zircão subarredondados e feldspatos pequenos, tabulares a deformados com contornos angulares entre quartzo e grãos opacos, o que sugere que outro material parental contribuiu, pelo menos em parte, para a pedogênese. Embora nenhum fragmento grosseiro dessa rocha fosse visível (havia matacões de itabirito no local), esta era provavelmente o gnaisse proterozóico imediatamente ao norte (figura 3).



Fonte: Autor

Figura 14 – Seções finas dos perfis. A (Bom Sucesso - NE. Inferior), onde muitos grãos grosseiros de muscovita, com cores brilhantes de interferência; B (Bom Sucesso - SW. Inferior), com grãos de chert avermelhados; C (Bom Sucesso - NE. Inferior), com pirofilita revestida de Fe, parcialmente alterada (também muscovita no canto superior esquerdo); e D (Piedade. Inferior), com feldspato deformado, parcialmente alterado. Todas as imagens são mostradas com luz polarizada parcialmente cruzada.

A análise micromorfológica permitiu, ainda, a identificação de restos orgânicos, como excrementos e estruturas micorrízicas (Figura 15 a, b), indicativos de elevada atividade biológica, coerente com os altos teores de matéria orgânica do solo observados, inclusive em maiores profundidades. Destaca-se, particularmente, a recorrente presença de esporo de fungo micorrízicos, mesmo no Neossolo, que apresentou elevados valores de densidade do solo e de partículas, o que sugere uma notável adaptação da vegetação às condições físicas restritivas deste ambiente edáfico.



Fonte: Autor

Figura 15: Seções finas dos perfis. A (Piedade terço superior), fragmentos de micorrizas; B (Bom Sucesso NE - terço inferior) restos de excrementos. Todas as imagens são mostradas com luz polarizada parcialmente cruzada.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi compreender como solos com fertilidade natural incomum, caracterizada por alta soma de bases e elevada capacidade de troca catiônica (CTC), poderiam se desenvolver a partir do intemperismo de itabiritos, tradicionalmente pobres em nutrientes.

Embora tanto o material parental quanto os horizontes dos solos apresentem minerais acessórios portadores de nutrientes, é improvável que essa composição, quando comparada ao itabirito "puro" (composto majoritariamente por óxidos de Fe e sílica), explique sozinha os teores observados. Os conteúdos de K, Ca e Mg nos itabiritos não se mostraram elevados a ponto de explicar, *per se*, a fertilidade registrada, como seria esperado em itabiritos dolomíticos (Rosière & Chemale Jr., 2000).

Assim, rejeita-se parcialmente a hipótese inicial. Os dados indicam a atuação conjunta de múltiplos fatores que, integrados, podem explicar a gênese e o funcionamento desses solos, tais como:

1) Composição acessória do mineral do solo e rocha. Apesar dos baixos teores totais de cátions básicos nos fragmentos de rocha amostrados, a detecção de alguns carbonatos pouco solúveis, provavelmente de Fe, Mg e Mn, e fosfatos sugere que a composição da rocha deve estar parcialmente envolvida, não somente como fases sólidas que controlam a disponibilidade de nutrientes, mas também como remanescentes de antigos componentes ricos em nutrientes que foram desgastados pelo tempo pedogenético.

2) A presença de quantidades consideráveis de muscovita em todos os solos, não apenas sugere um reservatório de K, mas sua alteração direta para vermiculita de alta carga e CTC em argilas permite a retenção eficiente de cátions básicos e micronutrientes.

3) Efeito do declive. *Pedons* nas partes superiores da paisagem invariavelmente apresentam menor fertilidade do que as encostas médias e especialmente as mais baixas. Isso indica que o fluxo de nutrientes em solução ou sorvidos em colóides orgânicos e minerais, ou mesmo em matéria orgânica particulada, está pelo menos parcialmente envolvido na alta fertilidade dos solos de interesse, que ocorreram no terço inferior.

4) Cobertura florestal. A vegetação, como fator de formação do solo (organismos), influencia a pedogênese, mas também é um resultado dela, como notado por Jenny (1941). Nas formações itabiríticas do Quadrilátero Ferrífero, solos rasos são ocupados principalmente por savanas, campos rupestres ou herbáceas esparsas, enquanto as florestas geralmente ocupam solos mais profundos e úmidos, nos quais a absorção de nutrientes é facilitada. Além disso, nessas florestas, a retenção de nutrientes é expressiva em biomassa e serapilheira, bem como seu ciclo biogeoquímico. Finalmente, árvores leguminosas fixadoras de N são abundantes em todos os locais, exceto no Neossolo na Serra da Piedade.

5) De modo geral, os solos estudados apresentam um desbalanço nutricional severo, alguns caracterizados pelo excesso de alguns macros e micronutrientes, como Ca, Mg, Fe e Mn, e pela carência severa de outros, como B e P. Esse desequilíbrio nutricional estabelece desafios significativos para seu eventual manejo, pois é necessário corrigir tanto as deficiências quanto os excessos para alcançar um balanço adequado. Essas áreas já são utilizadas por pequenos produtores para o cultivo de hortaliças, que produzem cerca de 44 mil toneladas por ano (Silva *et al.*, 2015). No entanto, muitos desses produtores carecem de assistência técnica especializada que compreenda as especificidades e complexidades desses solos, o que pode comprometer tanto a produtividade como a sustentabilidade dessas atividades.

Essas conclusões são baseadas nas premissas de que os solos são autóctones, o que foi demonstrado por nossos dados, com uma exceção. O pedon do terço inferior da Serra da Piedade é o único perfil para o qual os dados (matriz de 7,5 YR, baixos valores de Fe_2O_3 e χm, altos teores de Al_2O_3, picos de óxido de Ti na difração de raios-X e micromorfologia contrastante) sugerem uma diferença considerável na composição mineral ou geoquímica do itabirito. De fato, fragmentos de rocha naquele solo mostram os menores teores de Fe_2O_3, sugerindo que ele compreendia um nível de rocha com relativa escassez de Fe e, portanto, abundância de sílica e alumina. Alternativamente, também é possível que haja uma contribuição significativa de

outro material de origem, ou seja, gnaisse, que faz fronteira com o afloramento do itabirito naquele local. No entanto, como essa rocha também é pobre em nutrientes, isso provavelmente não representa nenhuma objeção relevante aos mecanismos listados acima.

6 REFERÊNCIAS

AGUIAR, N. O. *et al*. Bioactivity of humic acids isolated from vermicomposts at different maturation stages. **Plant and soil,** v. 362, p. 161-174, 2013.

ALECRIM, J. D. *et al.* **Recursos minerais do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: METAMIG, 1982.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1997.

ALVES, R. J. V.; SILVA, N. G. O fogo é sempre um vilão noscampos rupestres**?. Biodiversidade Brasileira**, Brasília/DF, v. 1, n. 2, p. 120-127, 2011.

AMORIM, Helen Carla Santana *et al*. What C: N ratios in soil particle-size fractions really say: N is preferentially sorbed by clays over organic C. **Catena**, v. 230, p. 107230, 2023.

ARAUJO, M. A. *et al*. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 11-25, 2014.

AZEVEDO, U. R. *et al*. Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero, MG - da lenda do Sabarabuçu ao patrimônio histórico, geológico, paisagístico e religioso. *In*: SCHOBBENHAUS, C.; SILVA, C. R. (Org.). **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2008. p. 301-313.

BAIÃO, E. E. *et al*. High C- and N-based soil fertility and microbial associations sustain the plant biodiversity of the campo rupestre in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 25, e00401, 2021.

BARRETO, A. C. *et al*. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 4, p. 415-425, 2006.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Evidence for a simple pathway to maghemite in earth and mars soils. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 66, n.15, p. 2801-2806, 2002.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; SCHAEFER,

C. E. G. R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.139-162.

BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. Soil color. Madison. **Soil Science Society of America**, v. 31, p. 172, 1993.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. *In*: BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. eds. **Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification**. London, Mineralogical Society, 1980. p.305-360.

CAMPANHA, M. M. *et al.* Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na Zona da Mata MG. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 805-812, 2007.

CARVALHO FILHO, A. de. *et al*. Óxidos de manganês em solos do quadrilátero ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 793-804, 2011.

CARVALHO FILHO, A. de.; CURI, N.; SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45,

n. 8, p. 903-916, 2010.

CARVALHO FILHO, A. de. *et al*. Iron oxides in soils of different lithological origins in Ferriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science**, v. 118, p. 1-7, 2015.

CHAVES, A. O.; KNAUER, L.G. Rochas vulcânicas potássicas intemperizadas como protólitos dos filitos hematíticos da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais). **Geochimica Brasiliensis**, v.34, p. 183-194, 2020.

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Micronutrientes no sistema solo-*Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. **Revista Árvore,** v. 27, n. 6, p. 769-778, 2003.

CHEMALE JR., F. *et al*. The tectonic evolution of the quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v. 65, n. 1-4, p. 25-54, 1994.

CHING, L. A. *et al.* Distribuição espacial de ferro e manganês trocáveis em solos do pantanal.

Ambiência, v. 12, n. 1, 233 - 249, 2016.

COELHO, M. R. *et al*. **Solos do Quadrilátero Ferrífero sob diferentes coberturas vegetais e materiais de origem**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2017. 130 p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS -

CFSEMG. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa, 1999. 359p.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. Weinheim, VCH, 1996. 573 p.

CORREA, M. M. *et al*. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1017-1031, 2008.

COSTA, A. C. S. *et al*. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, v. 47, p, 466-473, 1999.

COSTA, S. A. D. **Caracterização química, física, mineralógica e classificação de solos ricos em ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2003. 83 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) -Universidade Federal de Viçosa**,** UFV, Viçosa, 2003.

COSTA, S. A. D. *et al*. Pedogênese e classificação de Latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 38, n. 2, p. 359-371, 2014.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil.

Soil Science Society of America Journal, v. 48, n. 2, p. 341-346, 1984.

D'ANDRÉA, A. F. *et al*. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 39,

n. 2, p. 179-186, 2004.

DANA, J. D.; HURLBUT, J. C. S. **Manual de mineralogia**. v. 1. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system England: British Library, 1994. 43 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Informe Mineral,**

Desenvolvimento & Economia Mineral. vol.8. Brasília, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de**

métodos de análise de solo. 2ªed. Rio de Janeiro, Embrapa CNPS, 1997. 211 p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Embrapa CNPS, 3ª ed., 2011. 230 p.

FIGUEIREDO, M. do A. *et al*. Alteração superficial e pedogeomorfologia no sul do complexo bação-quadrilátero ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 713-729, 2004.

FITZPATRICK, R. W.; SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite - An indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, v. 27, p. 335-347, 1982.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Iron oxides in Brazilian oxisols: I. Mineralogy. **Soil Science Society of America**, v. 55, p. 1143-1149, 1991.

GARDOLINSKI, J. E.; MARTINS FILHO, H. P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p. 30-35, 2003.

GATTO, A. *et al*. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 735-740, 2009.

GIÁCOMO, R. G.; PEREIRA, M. G.; BALIEIRO, F. de. C. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição das frações húmicas no solo sob diferentes coberturas florestais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Viçosa, v. 3, n. 1, p. 42-48, 2008.

GOMES, T. C de A. **Resíduos orgânicos no processo de compostagem e sua influência sobre a matéria orgânica do solo em cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

GONÇALVES, G. M. C. **Caracterização tecnológica do itabirito anfibolítico da Mina de Brucutu-MG**. 2020. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

HARRIS, W. Phosphate minerals. *In*: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. (Ed.). **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 637-665.

HIGASHIKAWA, F. S. *et al*. Fourier transform infrared spectroscopy and partial least square regression for the prediction of substrate maturity indexes. **Science of the Total Environment**, v. 470-471, p. 536-542, 2014.

INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA- IDE. **Sisema**. 2024. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 04 nov. 2025.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1139-1147, 2003.

IUSS WORKING GROUP. WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES- WRB. **In international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. 4th ed.; International Union of Soil Sciences: Vienna, Austria, 2022.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: McGraw Hill, 1941. 279 p.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, v. 29, n. 1, p. 27-39, 1983.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.).

Tópicos em ciência do csolo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 107-138, 2000.

KEENEY, D. R.; NELSON, D. W. Nitrogen organic forms. *In*: PAGE, A. L. ed. **Methods of soil analysis**: Chemical and microbiological properties. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, p. 643-698, 1982.

KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. Roteiro da Excursão Pedológica Viçosa – Sete Lagoas. *In*: XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Departamento de Solos da UFV. Viçosa, 1995, 52 p.

KLEIN, C. **Manual of mineral science**. 22nd Edition, New York, 2001. 652 p.

LIMA, R. F. S. **Effect of chemical composition on the electrokinetic properties and floatability of chromite**. Ph.D. Thesis. Department of Natural Resources Engineering, Tohoku University, Japan, 1999.

LOPES, A. S. **Micronutrientes**: filosofias de aplicação e eficiência. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1999. 20 p. (Boletim Técnico, 10).

LUCAS, R. E.; KNEZEK, D. B. Climatic and soil conditions promoting micronutrient deficiencies in plant. *In*: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. **Micronutrients in Agriculture**. Madison: Soil Science of Society of America, 1972

MAHER, B. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 3, 42, n. 1-2, p.76-91, 1986.

MALLA, P. B. Vermiculites. *In*: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. (eds.). **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison, p. 501-529, 2002.

MANTOVANI, J. R. *et al.* Teores de fósforo no solo e produção de alface crespa em função de adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 2369-2379, 2014.

MATTIELLO, E. M. *et al.* Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1281-1290, 2009.

MIRANDA, J. M. A. Capítulo 3: Campo magnético crustal. *In*: MIRANDA, J. M. *et al.* (Org.). **Fundamentos de geofísica**. Lisboa: Instituto de Geofísica Infante D. Luís, 2002. p. 34-39.

MMX MINERAÇÃO E METÁLICOS S. A. **Geologia e trabalhos de pesquisa realizados na Serra de Bom Sucesso – MG**. Relatório Técnico. Belo Horizonte, 2009.

MUNSELL. **Soil color charts**. Baltimore, Munsell Color Company, 1994. 8 p.

MUNEER, M.; OADES, J. M. The role of Ca–organic interactions in soil aggregate stability.

I. Laboratory studies with ^{14}C-glucose, $CaCO_3$ and $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. **Australian Journal of Soil Research**, v. 27, p. 389-399, 1989.

MURPHY, C. P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: AB Academic Publishers, 1986. 149 p.

NERY, F. H. Variabilidade pluviométrica na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: análise da média anual de precipitação do período de 1991-2002. **Cadernos do LESTE**, v.16,

p. 22-32, 2016.

NOGUEIRA, M. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Interações microbianas na disponibilidade e absorção de manganês por soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 1605- 1612, 2002.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.

OLIVEIRA, D. A. *et al*. Litossequência de solos na Serra da Moeda, Quadrilátero Ferrífero.

Geociências, v. 40, n. 4, p. 1063-1080, 2021.

OLIVEIRA, G. A. I.; CLEMENTE, L. C.; VIAL, D. S. Excursão à Mina de Ouro de Morro Velho. *In*: II. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE.

Anais... Soc. Bras. Geol., Núcleo Minas Gerais, Bol. v. 3, p. 497-505. 1983.

OLIVEIRA, P. C. R. *et al*. Nitrato e amônio na solução do solo sob diferentes usos agrícolas, no município de Paragominas-PA. **Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales**, 2016.

OLIVEIRA, D. E.; ASSIS, D. C.; FERREIRA, C. D. C. M. Dinâmica climática regional em municípios da Zona Da Mata, Campo das Vertentes e Sul e Sudoeste de Minas Gerais: as ondas de calor e frio. **Revista Brasileira de Climatologia** v.1, p. 290-310, 2018.

PÁDUA, E. J. *et al*. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 725-736, 2015.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil Microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic, 1989. 272 p.

PEREIRA, A. F. S. **Florística, fitossociologia e relação solo-vegetação em campo rupestre ferruginoso do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2010.

PEREIRA, M. C. **Aspectos genéticos e morfológicos das cavidades naturais da Serra da Piedade-Quadrilátero Ferrífero/MG**. 2012. 150f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

PIRAJANO, F. **Hydrothermal processes and minerals systems**. Geological Survey of Western Australia: Springer, 2009. 1250 p.

PIRES, A. A. *et al*. Estudos geoquímicos de itabiritos da Serra do Sapo, Espinhaço Meridional, Minas Gerais. **Geonomos**, v. 22, n. 2, p.1-17, 2014.

PORTUGAL, A. F. *et al*. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 575-585, 2010.

PREETZ, H. *et al*. Relationship between magnetic properties and reddening of tropical soils as indicators of weathering. **Geoderma**, v.303, p. 143-149, 2017.

PRIMO, D. C.; MENEZES, R. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no Nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v. 7, n. 5, p. 059901, 2011.

QUAGGIO, J. A.; van RAIJ, B. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. *In*: van RAIJ, B. *et al*. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, p.181-188, 2001.

QUÉMÉNEUR, J. J. G. *et al*. Geologia da folha Lavras. *In*: COMPANHIA MINERADORA

DE MINAS GERAIS. **Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro**. Projeto Sul de Minas – Etapa I: relatório final. Belo Horizonte: COMIG/UFMG/UFRJ/UERJ, 2003. v. 1, p. 259-319. CD-ROM.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

RENGER, F. E. *et al*. Evolução sedimentar do supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Geonomos**, v. 2/1, p.1-11, 1994.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O Quadrilátero Ferrífero-MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. **Geonomos**, v. 18, n. 1, p. 34-37, 2010.

ROSIÈRE, C. A. *et al*. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. **Journal of Structural Geology**, v. 23, n. 9, p. 1429-1440, 2001.

ROSIÈRE, C. A. Strukturelle und texturelle untersuchungen in der eisenerzlagerstaette "Pico de Itabira" bei Itabirito, Minas Gerais, Brasilien. **Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen**, v.9, 1981. 302 p.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR. F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero–uma visão geral e discussão. **Geonomos**, v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

ROSS, S. J.; FRANZMEIER, D. P.; ROTH, C.B. Mineralogy and chemistry of manganese oxides in some Indiana soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 1, p. 137-143, 1976.

SÁNCHEZ-CAMAZANO, M.; FORTEZA, J.; LORENZO, L. F. Occurrence of pyrophyllite in soils from Sierra de San Pedro (Cáceres, Spain). **Clay Minerals**, v. 23, n. 3, p. 339-345, 1988.

SANCHES, J. G. *et al*. Caracterização de itabirito compacto para análise de uso como corpo moedor. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA (ENTMME), 29., 2022, Armação dos Búzios. **Anais** [...] Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022. p. 439-446.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Rev. ampl. Viçosa, MG: SBCS, 2013. 100 p.

SCHAEFER, C. E. G. R. *et al*. Solos desenvolvidos sobre canga ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. *In*: CARMO; F. F.; KAMINO, L. H. Y. (Org.). **Geossistemas ferruginosos do Brasil**: áreas Prioritárias para a conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. Belo Horizonte, MG: 3i, 2015. p. 77-102.

SCHAEFER, C. E. G. R. *et al*. Características químicas e mineralogia de solos perférricos da Serra Sul de Carajás. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 11,

n. 1, p. 57-69, 2016.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, v. 139, n. 4, p 344-350, 1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. *In*: DIXON, J. B.; WEED, S. B. eds.

Minerals in Soil Environments. 2. ed. Madison, Soil Science Society of America, p.380- 427, 1989.

SILVA, J. E. *et al*. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.541-547, 1994.

SILVA, L. G. da. *et al*. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 613-620, 2009.

SILVA, W. F. *et al*. Diagnóstico da produção de hortaliças na região metropolitana de Belo Horizonte. **Horticultura Brasileira**, v. 33, p. 368-372, 2015.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, n. 1-2, p. 55-66, 2010.

SIQUEIRA NETO, M. *et al*. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 709-717, 2009.

SKORUPA, A. L. A. *et al*. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 11-22, 2012.

SOIL SURVEY STAFF**. Keys to Soil Taxonomy.** 13th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2022.

SOUZA JÚNIOR, I. G. *et al*. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513- 519, 2010.

SOUZA, C. G. **Caracterização de solos nos arredores da serra três irmãos e da serra da moeda-quadrilátero Ferrífero/MG**. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2006.

STOOPS, G. **Guidelines for the analysis and description of soil and regolith thin sections**. Madison: SSSA, 2003.184 p.

TEIXEIRA, W.; FIGUEIREDO, M. C. H. An outline of early proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil: a review. **Precambrian Research**, v. 53, n. 1-2, p. 1-22, 1991.

TRENDALL, A. F. Varve cycles in the weeli wolli formation of the precambrian hamersley group, Western Australia. **Economic Geology**, v.68, n. 7, p.1089-1097, 1973.

TRENDALL, A. F. The Hamersley basin. *In*: TRENDALL, A. F.; MORRIs R. C. (eds.) **Iron-formation**: facts and problems. Amsterdam, Elsevier, p .69-129, 1983.

TRENDALL, A. F. The significance of iron-formation in the precambrian stratigraphic record. *In*: ALTERMANN, W.; CORCORAN, P. L. (Eds.). **Precambrian sedimentar environments**: a modern approach to ancient depositional systems. Special Publication Number 33 of the International Association of Sedimentologists. n. 33, p. 33-66, 2002.

UHLEIN, A.; NOCE, C. M. Quadrilátero Ferrífero. *In*: HASUI, Y. *et al*. (Orgs.) **Geologia do Brasil**. São Paulo, Beca-Ball Ed. p. 228-235, 2012.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. Department of

Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Keys to Soil Taxonomy**. 6.ed. Washington, 1994. 306 p.

VAN REMORTEL, R. D.; SHIELDS, D. A. Comparison of clod and core methods for determination of soil bulk density. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 24, n. 6, p. 2517-2528, 1993.

VASCONCELOS, J. M. *et al*. Solos metalíferos: atributos químicos nas diferentes fitofisionomias da Serra Sul, Serra dos Carajás, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 11, n. 1, p. 49-55, 2016.

VIANA, J. H. M. *et al.* Occurrence of magnetite in the sand fraction of an Oxisol in the Brazilian savanna ecosystem, developed from a magnetite-free lithology. **Soil Research**, v. 44, n. 1, p. 71-83, 2006.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas. *In*: TEIXEIRA, P. C. *et al*. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa Solos, p. 76-81, 2017.

VIANELLO, R. L.; MAIA, L. F. P. G. Estudo preliminar da climatologia dinâmica do estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuario**, v. 12, p. 6-8, 1986.

VILELA, E. F.; INDA, A. V.; ZINN, Y. L. Soil genesis, mineralogy and chemical composition in a steatite outcrop under tropical humid climate in Brazil. **Catena** v.183, p. 104234, 2019.

ZELAZNY, L. W.; THOMAS, P. J.; LAWRENCE, C. L. Pyrophyllite–talc minerals. *In*: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. (Ed.). **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 415-430.

APÊNDICES

Apêndice A – Descrição dos perfis

Perfil da Serra de Bom Sucesso (porção NE) – Terço superior

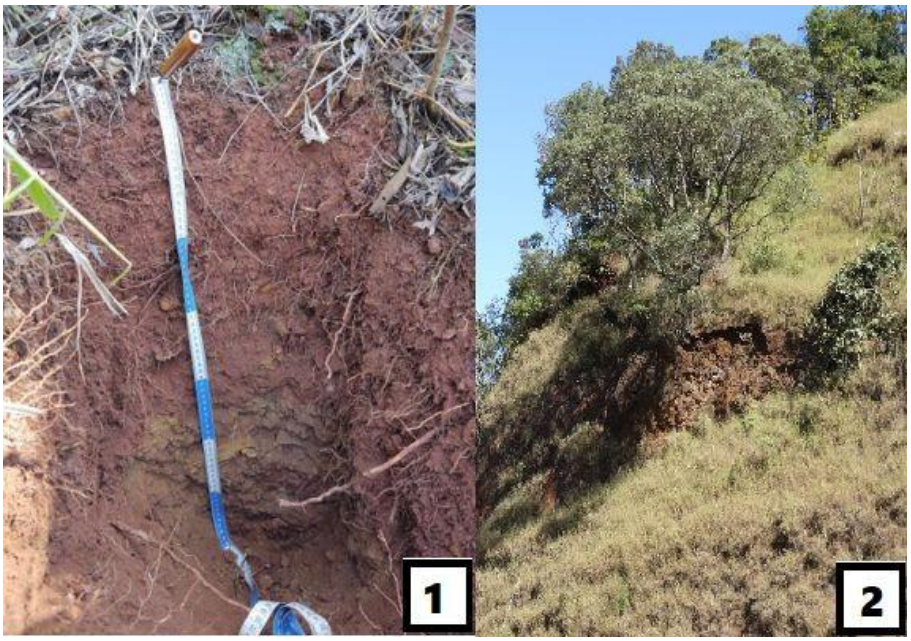


Figura 16: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2) (o perfil se situa atrás da ruptura do declive).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 20/05/2022

CLASSIFICAÇÃO – CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico

LOCALIZAÇÃO – MG-335, Bom Sucesso em direção a cidade de São Tiago a noroeste, pela estrada de terra (um quarteirão após a empresa Inovar Soluções), ao passar o sítio "Roça do Morro do Campo".

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE -21º 0' 44,14014'' **LONGITUDE** -44º41'49,80142''**ALTITUDE -** 1170m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Abertura de trincheira na face SE, 37º de declividade, com vegetação de floresta subperenifólia com indivíduos dominantes com 15 cm de diâmetro, 10 m de altura e serapilheira de 2-3 cm espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

PEDREGOSIDADE - Pedregoso

ROCHOSIDADE - Rochoso

RELEVO LOCAL – Escarpado

EROSÃO – Laminar moderada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de mata

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A: 0-3cm; 5YR 5/4; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e média em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade pouca e fraca; transição plana e difusa.

Bi: 3-33cm; 5YR 5/4; textura argilo-arenosa; estrutura moderada e média em blocos subangulares; cerosidade pouca e fraca; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.

BC: 33-50r cm; 5YR 5/4; textura argilo-arenosa; estrutura fraca e média em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES: Finas e muito finas abundantes no horizonte A. Médias comuns e finas abundantes no horizonte B. Finas e poucas no horizonte BC.

OBSERVAÇÕES: Horizonte superficial muito cascalhento. Relevo escarpado e presença constante de afloramento rochoso

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

Horizonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+} cmol$_c$ dm^{-3}	Al^{3+}	H + Al	P-REM mg/L
A	0-3	5,1	79	3,8	6	1,5	0,8	0,5	7,9	26,8
Bi	3-33	4,9	46,3	7,7	29	0,7	0,3	0,2	7,9	10,2
BC	33-50	5,5	19	2,1	13	0,3	0,2	0	3	12,6

SB	t cmol$_c$ dm^{-3}	T	V	m %	M.O	Zn	Fe	Mn mg dm^{-3}	Cu	B	S
2,51	3,0	10,4	24,1	16,6	4,1	3,1	45,4	156	3,0	0,2	10,1
1,09	1,3	6	18,2	15,5	5,6	1,3	43,6	38	0,4	0,1	32,8
0,57	0,6	3,6	15,9	0	2,3	0,4	45,6	17,8	0,3	0,1	26

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida		CLASSE TEXTURAL		VIDAD E DA ARGILA
< 2mm TFSA	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila					
%			(dag/kg)				===	===	===	===	cmolc/kg
56,4	33	10,3	27	28,1	7,6	37,2	5YR 5/4		nco-argilo- arenosa		
42,5	21,0	36,5	25,08	29,1	3,1	42,7	5YR 5/4		Argilo-arenosa		14
53,8	15,6	30,5	18,19	36	0,1	45,7	5YR 5/4		Argilo arenosa		7,8

Fonte: Autor

Perfil da Serra de Bom Sucesso (porção NE) – Terço médio

Figura 17: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 20/05/2022

CLASSIFICAÇÃO – CAMBISSOLO HÁPLICO Perférrico

LOCALIZAÇÃO – MG-335, Bom Sucesso em direção a cidade de São Tiago a noroeste, pela estrada de terra (um quarteirão após a empresa Inovar Soluções), ao passar o sítio "Roça do Morro do Campo".

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE -21º 0' 51,59884'' **LONGITUDE** -44º41'49,57706''**ALTITUDE -**1097m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face SE, 20º de declividade, com vegetação de floresta perenifólia preservada com indivíduos dominantes com 40-50 cm de diâmetro, 25-30 m de altura e serapilheira de 6-8 cm de espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

PEDREGOSIDADE - Pedregoso

ROCHOSIDADE - Rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

EROSÃO – Não observada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de mata

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1: 0-15cm; 5YR 6/4; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca; transição plana e difusa.

A2: 15-34cm; 5YR 4/3; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca; transição plana e difusa.

Bi: 34-73r cm; 2,5YR 3/4; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca.

Raízes: Grossas e raras e finas e comuns no horizonte A1. Grossas e raras e finas e comuns no horizonte A2. Finas e comuns no horizonte B.

OBSERVAÇÕES: Floresta densa, alta diversidade de indivíduos, mesmo sob relevo declivoso.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

izonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	P-REM mg/L
						cmolc dm^{-3}				
A1	0-15	4,6	119,4	5,6	11	4,5	2,1	0,4	11,4	24,8
A2	15-34	4,5	53,3	3,0	11	0,7	0,5	0,9	11,9	14,7
Bi	34-73r	4,7	17,3	1,8	6	0,2	0,1	0,4	5,3	12,1

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%					mg dm^{-3}		
6,87	7,3	18,3	37,6	5,5	10	3,3	69,5	179,3	0,6	0,2	17,9
1,37	2,3	13,3	10,3	39,6	4,9	1,1	69,8	56,1	0,5	0,1	23,9
0,37	0,8	5,7	6,6	51,9	2,2	0,2	41,4	19	0,4	0,1	27,5

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida	CLASSE TEXTURAL	ATIVIDADE DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
%			(dag/kg)				===	=== === ===	cmolc/kg
49	28,9	22,1	38,0	21	13,9	27,0	5YR 6/4	Franco-argilo-arenosa	
54,4	25,0	20,5	36	20,6	12,1	31,3	5YR 4/3	Franco-argilo-arenosa	
62,6	19,2	18,2	41,65	14,4	12,2	31,8	2,5YR 3/4	Franco-argilo-arenosa	17,8

Fonte: Autor

Perfil da Serra de Bom Sucesso (perção NE) – Terço inferior

Figura 18: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 20/05/2022

CLASSIFICAÇÃO – NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico

LOCALIZAÇÃO – MG-335, Bom Sucesso em direção a cidade de São Tiago a noroeste, pela estrada de terra (um quarteirão após a empresa Inovar Soluções), ao passar o sítio "Roça do Morro do Campo".

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE -21º 1' 4,48831'' **LONGITUDE** -44º41'59,70239'' **ALTITUDE -** 1034m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face SE, 15º de declividade, com mata secundaria avançada com indivíduos dominantes com 40-50 cm de diâmetro, 25 m de altura e serapilheira de 4-5 cm de espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

PEDREGOSIDADE - Pedregoso

ROCHOSIDADE - Rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

EROSÃO – Não observada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de mata

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A: 0-11cm; 5YR 3/3; textura franco-argilo-arenosa; estrutura moderada e média em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca; transição plana e difusa.

B: 11-60r cm; 2,5 YR 4/4; textura franco argilo-arenosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e moderada.

Raízes: Finas e comuns no horizonte A. Grossas a finas e raras no horizonte B.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

zonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							P-REM
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+} cmol$_c$ dm^{-3}	Al^{3+}	H + Al	mg/L
A	0-11	5,5	67,9	8,4	38	4,5	1,0	0,3	6,9	20,8
B	11-60r	4,7	26,9	1,5	9	0,6	0,3	0,6	7,9	15,7

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%				mg dm^{-3}			
5,7	6	12,6	45,3	5	9,6	5,5	57,2	165,2	0,4	0,2	11,9
0,9	1,5	8,8	10,2	40	3,5	2,2	37,4	91,2	3,7	0,1	5

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida		CLASSE TEXTURAL		ATIVIDADE DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila					
%			(dag/kg)				===	===	===	===	cmolc/kg
41,4	11,3	47,3	28,5	27,1	13	31,5	5YR 3/3		Franco-argilo-arenosa		
66,7	12,9	20,3	15,9	36,3	11,3	36,5	2,5 YR 4/4		Franco-argilo-arenosa		24,1

Fonte: Autor

Perfil da Serra de Bom Sucesso (porção SW) – Terço superior

Figura 19: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 17/06/2022

CLASSIFICAÇÃO – LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico

LOCALIZAÇÃO – MG-332, Bom Sucesso em direção à Ibituruna, acessar estrada de chão (um quarteirão após a empresa Inovar Soluções) até avistar a placa "Sítio Shalom" (à direita da rodovia). Acesso a trilha à esquerda da placa.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE -21º6'41,0478'' **LONGITUDE** -44º44'55,48416''**ALTITUDE –** 960 m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face Leste, 30º de declividade, com vegetação perenifólia preservada com indivíduos dominantes com 60 cm de diâmetro, 22 m de altura e serapilheira de 5-8 cm espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

PEDREGOSIDADE - Pedregoso

ROCHOSIDADE – Rochoso

RELEVO LOCAL – Forte ondulado

EROSÃO – Não observada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de mata

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A: 0-20 cm; 2,5 YR 4/8; textura franco-argilosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca; transição plana e difusa.

B: 20-49 cm; 2,5 YR 5/8; textura argila; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca; transição plana e difusa.

Bw: 49-85+ cm; 2,5 YR 5/8; textura franco-argilosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade comum e fraca.

Raízes: Médias e finas e comuns no horizonte A. Médias e comuns no B1. Finas e raras no B2.

OBSERVAÇÕES: Floresta densa, alta diversidade de indivíduos mesmo sob relevo declivoso.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

Horizonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	P-REM
			mg dm^{-3}			cmol$_c$ dm^{-3}				mg/L
A	0-20	5,2	48,5	2,4	6	0,9	0,4	0,4	5,9	11,6
B	20-49	5,2	18,1	1,5	5	0,2	0,1	0,2	6	7,4
Bw	49-85+	5	12,1	1,2	4	0,3	0,2	0,1	5,2	6,9

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%					mg dm^{-3}		
1,4	1,8	7,3	19,0	22,5	5,5	1,3	31,2	60,5	1,6	0,1	24,2
0,4	0,6	6,4	6,1	33,9	2,91	0,2	31,1	38,8	2,2	0,2	13,1
0,5	0,6	5,7	8,6	20	2,1	0,3	31,7	32,9	3,1	0,1	15

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida	CLASSE TEXTURAL	VIDAD E
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila			DA ARGILA
%			(dag/kg)				===	===	cmolc/kg
61,6	23,3	15,0	28,2	10,5	25	36,3	2,5 YR 4/8	Franco-argilosa	
72,7	14,5	12,8	22,1	13,6	22,7	41,6	2,5 YR 5/8	Argila	15,4
69,1	13,5	17,4	7,5	27,3	28,5	36,7	2,5 YR 5/8	Franco-argilosa	15,5

Fonte: Autor

Perfil da Serra de Bom Sucesso (porção SW) – Terço médio

Figura 20: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 17/06/2022

CLASSIFICAÇÃO – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Acriférrico

LOCALIZAÇÃO – LOCALIZAÇÃO – MG-332, Bom Sucesso em direção à Ibituruna, acessar estrada de chão (um quarteirão após a empresa Inovar Soluções) até avistar a placa "Sítio Shalom" (à direita da rodovia). Acesso a trilha à esquerda da placa.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE-21º 6' 49,55152''**LONGITUDE** -44º 44' 59,23532''**ALTITUDE –** 940 m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face Leste, 26º de declividade, área de transição da mata perenifólia para cerrado, com indivíduos dominantes com 60 cm de diâmetro, 22 m de altura e serapilheira de 4-6 cm de espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

PEDREGOSIDADE - Pedregoso

ROCHOSIDADE – Não rochoso

RELEVO LOCAL – Forte ondulado

EROSÃO – Laminar moderada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de mata

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A: 0-25cm; 2,5 YR 3/4; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade rara e fraca; transição plana e difusa.

B: 25-65cm; 2,5 YR 4/6; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e grande em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade rara e fraca; transição plana e difusa.

Bw: 65-110+ cm; 5YR 4/6; textura franco-argilo-arenosa; estrutura forte e média em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade rara e fraca.

Raízes: Grossas comuns, médias e finas raras no horizonte A. Médias e finas e comuns no horizonte B1. Finas e raras no B2.

OBSERVAÇÕES: Presença de saprolitos no horizonte B2. Diminuição marcante da intensidade da tonalidade vermelha do solo conforme a descida da topossequência.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

izont e	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	P-REM mg/L
						cmol$_c$ dm^{-3}				
A	0-25	4,8	62,5	4,6	6	1,4	0,7	0,4	7	15,4
B	25-65	5,3	15,2	1,3	6	0,3	0,2	0	3,6	10,5
Bw	65-110+	5,3	6,4	0,7	4	0,3	0,2	0	2,1	13,7

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%				mg dm^{-3}			
2,2	2,6	9,23	24,2	15,2	5,5	1,6	24	186,2	3,6	0,2	13,1
0,6	0,6	4,2	14,3	0	2	0,5	23,6	74,9	7,4	0,1	5,7
0,5	0,5	2,55	17,5	0	0,9	0,3	49,2	26,3	2,6	0,1	5,2

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida	CLASSE TEXTURAL	ATIVIDADE DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
%			(dag/kg)				=== ===	=== ===	cmolc/kg
50,2	20,2	29,6	26,0	24,1	13,0	36,9	2,5 YR 3/4	Franco-argilo-arenosa	
56,3	14,8	28,8	23,4	25,5	15,0	36,1	2,5 YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	11,6
58,8	16,6	24,5	19,1	28,3	22,8	29,7	5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	8,6

Fonte: Autor

Perfil da Serra de Bom Sucesso (porção SW) – Terço inferior

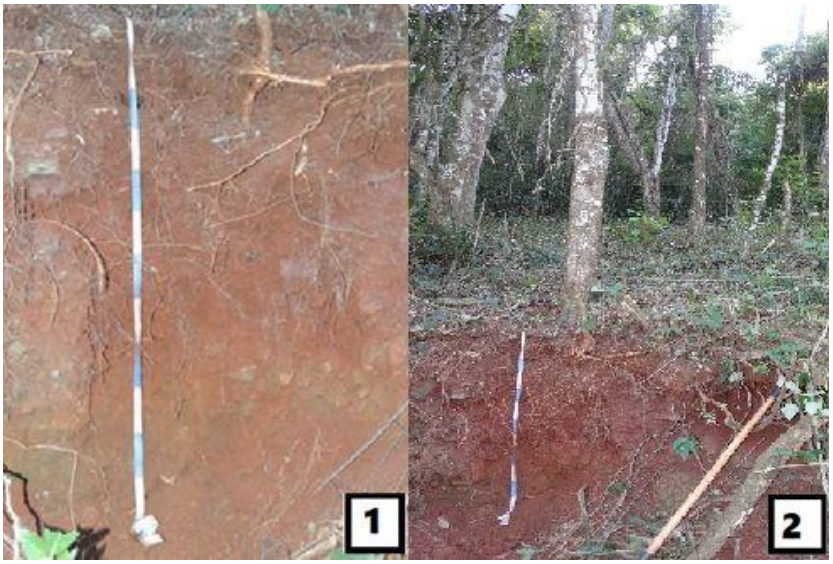


Figura 21: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 17/06/2022

CLASSIFICAÇÃO – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distroférrico

LOCALIZAÇÃO – LOCALIZAÇÃO – MG-332, Bom Sucesso em direção à Ibituruna, acessar estrada de chão (um quarteirão após a empresa Inovar Soluções) até avistar a placa "Sítio Shalom" (à direita da rodovia). Acesso a trilha à esquerda da placa.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE -21º 6' 49,67017''**LONGITUDE** -44º 45' 5,19462'' **ALTITUDE –** 890 m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face Leste, 12º de declividade, com mata similar a Atlântica com presença de Cecrópia sp., com indivíduos dominantes com 25-30 cm de diâmetro, 18-20 m de altura e serapilheira de 8-10 cm de espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Quartzito, xistos e formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

PEDREGOSIDADE – Muito pedregoso

ROCHOSIDADE – Não rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

EROSÃO – Laminar moderada

DRENAGEM – moderadamente drenada

USO ATUAL – Área de mata

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1: 0-20 cm; 2,5 YR3/4; textura argila; estrutura média e grumosa; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; raízes grossas a finas muito abundantes; transição plana e clara.

A2: 20-45 cm; 2,5 YR3/6; textura franco-argilosa; estrutura fraca e média em blocos subangulares tendendo a grumosa; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade rara e fraca; transição plana e clara.

B: 45-75 cm; 2,5 YR4/6; textura franco-argilosa; estrutura moderada e pequena em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade rara e fraca; transição plana e clara; transição plana e clara.

Bw1: 75-110+ cm; 5YR 5/6; textura franco-argilosa; estrutura moderada e pequena em blocos subangulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade rara e fraca;

Raízes: Grossas a finas muito abundantes no horizonte A1. Grossas e médias e comuns no horizonte A2. Médias e finas e comuns no horizonte B.

OBSERVAÇÕES: Horizonte B altamente pedregoso, próximo a pequeno curso d'água.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

Horizonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	P-REM mg/L
						cmol$_c$ dm^{-3}				
A1	0-20	5,7	124,1	3,7	6	12,7	2,7	0,2	2,3	34,4
A2	20-45	5,2	78,6	2,5	6	7,4	1,9	0,1	3,2	24,3
B	45-75	5	18,8	0,7	7	1,0	0,8	0	3,2	9,2
Bw	75-110+	4,9	9,1	0,4	7	0,4	0,3	0	1,6	12,1

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%		mg dm^{-3}					
15,7	15,9	18	87,2	1,0	11,1	17	15,3	378,9	0,8	0,2	20
9,5	9,6	12,7	74,8	0	5,6	10,7	21,9	392	4,3	0,2	11,5
1,9	1,9	5,1	37,3	0	1,3	0,9	60,2	152,5	5,9	0,1	41
0,7	0,7	2,3	31,8	0	0,7	0,8	58,3	114,6	1,7	0,2	11,6

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida	CLASSE TEXTURAL	ATIVIDADE DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
%			(dag/kg)				=== ===	=== ===	cmolc/kg
46,5	30,7	22,8	20,7	16,1	16,3	46,9	2,5 YR3/4	Argila	
31,7	16,7	51,6	16,3	18,3	31,7	33,6	2,5 YR3/6	Franco-argilosa	
42,9	11,6	45,6	23,9	20,9	19,2	35,9	2,5 YR4/6	Franco-argilosa	14,2
29,1	9,7	61,8	23,7	21,7	18,8	35,7	5YR 5/6	Franco-argilosa	6,5

Perfil da Serra Piedade – Terço superior

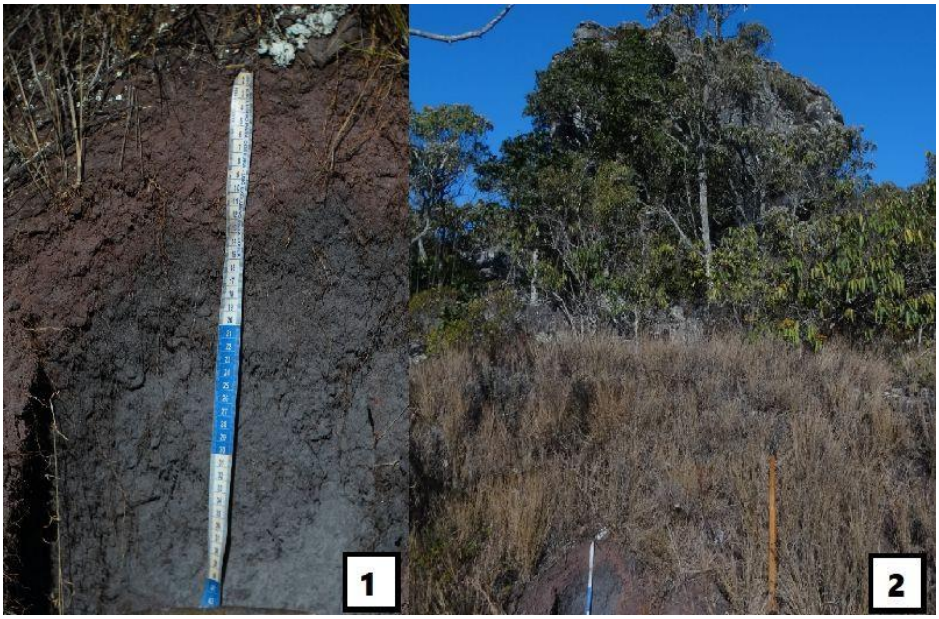


Figura 22: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 27/07/2022

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico

LOCALIZAÇÃO – Principal acesso via MG-435 a partir de Caeté, acessando MG-900 até a entrada da Basílica Nossa Senhora da Piedade, próximo ao estacionamento

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE-19º49’26,13461’’**LONGITUDE** -43º41’19,99867’’**ALTITUDE –** 1511 m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Abertura de trincheira na face Oeste, 28º de declividade, com vegetação de campo rupestres, com indivíduos dominantes com 15 cm de diâmetro e 3 m de altura.

MATERIAL DE ORIGEM – Filitos e Itabiritos

PEDREGOSIDADE – Muito Pedregoso

ROCHOSIDADE – Rochoso

RELEVO LOCAL – Forte ondulado

EROSÃO – Laminar moderada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de preservação ambiental

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A: 0-13 cm; 10R 2,5/2; textura franco-arenoso; estrutura fraca e pequena em blocos angulares; não plástica e não pegajosa; transição irregular e abrupta.

C1: 13-30 cm; 10R 2/0; textura franco-arenoso; não plástica e não pegajosa; transição irregular e abrupta.

C2: 30-60+ cm; 10R 2/0; textura areia franca; não plástica e não pegajosa.

Raízes: Finas e comuns no horizonte A e C1

OBSERVAÇÕES: Vegetação típica de altitude, com grandes afloramentos rochosos. Horizonte C1 tipicamente sem estrutura desenvolvida, mas com presença de raízes diferenciando o horizonte.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

Horizonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+} cmol$_c$ dm^{-3}	Al^{3+}	H + Al	P-REM mg/L
A	0-13	4,7	22,2	1,5	5	1,5	0,4	0,4	4,4	53,7
C1	13-30	5,2	5,1	0,1	3	2,6	0,6	0,1	2,2	59,1
C2	30-60+	5,5	2,4	0,1	3	2,1	0,6	0,1	1,1	63,1

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%				mg dm^{-3}			
1,9	2,3	6,3	30,4	17,2	2,4	0,9	144	3	0,1	0,1	3,8
3,2	2,3	5,4	59,1	3,0	0,8	0	93,9	0,4	0	0,1	2,9
2,7	2,8	3,8	71	3,0	0,5	0	50,5	0,3	0	0,1	12

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida	CLASSE TEXTURAL	VIDAD E DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
%			(dag/kg)				===	===	cmolc/kg
50,5	26,5	23,1	42	31,8	7,8	18,4	10R 2,5/2	Franco-arenoso	
56,3	19,9	24,5	23,6	48	10,7	17,7	10R 2/0	Franco-arenoso	30,6
57,1	16,1	26,9	30,4	51,2	7,6	10,7	10R 2/0	Areia franca	35,4

Fonte: Autor

Perfil da Serra Piedade – Terço médio

Figura 23: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 27/07/2022

CLASSIFICAÇÃO – PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário latossólico

LOCALIZAÇÃO – Principal acesso via MG-435 a partir de Caeté, acessando MG-900 (após o bar "Trevo das Bananas") até a entrada da Basílica Nossa Senhora da Piedade e seguindo em direção ao estacionamento da Serra da Piedade.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS: -

LATITUDE -19º48'39,65267'' **LONGITUDE** -43º40'30,63774'' **ALTITUDE –** 1345 m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face Oeste, 12º de declividade, com vegetação perenifólia de encosta, com indivíduos dominantes com 35 cm de diâmetro,15 a 20 m de altura e serapilheira de 5-8 cm espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Filitos e Itabiritos

PEDREGOSIDADE – Muito pedregoso

ROCHOSIDADE – Rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

EROSÃO – Laminar moderada

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de preservação ambiental

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A: 0-20 cm; 10R 4/2; textura franco-argilo-arenosa; estrutura média e grumosa; não plástica e não pegajosa; transição plana e difusa.

Ac: 20-40 cm; 10R 3/2; textura franco-argilo-arenosa; estrutura pequena e moderada em blocos subangulares; ligeiramente plástica e não pegajosa; cerosidade pouca e fraca; transição plana e difusa.

Bwc: 40-60+ cm; 10R 3/6; textura muito argilosa; não plástica e não pegajosa; estrutura pequena e moderada em blocos subangulares.

Raízes: Grossas a finas e abundantes no horizonte A1 e A2. Grossas a finas e comuns no horizonte BC.

OBSERVAÇÕES: Horizonte A2 já apresentando alta pedregosidade. Horizonte Bwc com altíssima pedregosidade, indicando proximidade com a rocha de origem.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

Horizonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al cmol$_c$ dm^{-3}	P-REM mg/L
A1	0-20	4,3	73,5	4,0	7	0,3	0,1	0,1	23,1	16,8
A2	20-40	4,8	33,2	3,4	14	0,4	0,2	1,3	9	9
Bwc	40-60+	4,9	19,9	2,3	12	0,5	0,2	1	7,1	10,4

SB	t	T	V	m	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	cmol$_c$ dm^{-3}			%					mg dm^{-3}		
0,6	0,6	23,7	2,4	14,9	11,0	1,8	198,6	29,2	0,4	0,2	6
0,7	2,0	9,7	7,4	64,4	5,4	5	68,7	10,1	0,2	0,1	14,4
0,8	1,8	7,91	10,2	55,2	4,2	0	44,8	3,8	0,2	0,1	4,5

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida		CLASSE TEXTURAL		VIDAD E DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila					
%			(dag/kg)				===	===	===	===	cmolc/kg
33,9	27,3	38,6	47,3	19,1	7,7	26	10R 4/2		Franco-argilo-arenosa		
39,6	20,4	39,9	45,7	19,9	13	21,3	10R 3/2		Franco-argilo-arenosa		
30,7	21,4	47,8	13,0	9,1	6,3	71,6	10R 3/6		Muito argilosa		11,1

Fonte: Autor

Perfil da Serra Piedade – Terço inferior

Figura 24: Fotografias do perfil (1) e da paisagem circundante (2).

A – DESCRIÇÃO GERAL

DATA: 28/07/2022

CLASSIFICAÇÃO – LATOSSOLO AMARELO Distrófico

LOCALIZAÇÃO – Principal acesso via MG-435 a partir de Caeté, até a entrada do recanto Monsenhor Domingos e seguindo em acesso de terra, em direção ao estacionamento do recanto.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

LATITUDE-19º48’ 29,95952’’**LONGITUDE**-43º 39’ 32,66881’’**ALTITUDE–**1189 m

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em barranco na face Oeste, 12º de declividade, com vegetação perenifólia, com indivíduos dominantes com 80 cm de diâmetro ,15 a 20 m de altura e serapilheira de 1-2 cm espessura.

MATERIAL DE ORIGEM – Filitos e Itabiritos **PEDREGOSIDADE –** Pouco pedregoso

ROCHOSIDADE – Rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

EROSÃO – Laminar forte

DRENAGEM – Bem drenada

USO ATUAL – Área de regeneração, com solo exposto e plantio de espécies nativas

B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1: 0-30 cm; 7,5YR 4/2; textura argilo-arenosa; estrutura média e forte em blocos subangulares; plástica e ligeiramente pegajosa; cerosidade pouca e fraca; transição plana e difusa.

A2: 30-50 cm; 7,5YR 5/6; textura argila; estrutura média e moderada em blocos subangulares; muito plástica e pegajosa; transição plana e difusa.

Bw: 50-85+ cm; 7,5YR 5/8; textura muito argiloso; muito plástica e muio pegajosa; estrutura pequena e fraca em blocos subangulares; cerosidade pouca e fraca.

Raízes: Médias e finas e comuns no horizonte A1. Finas e comuns no horizonte A2.

OBSERVAÇÕES: Muitos bioporos, baixo aporte de MOS.

C – RESULTADOS ANALÍTICOS –

Horizonte	Profundidade	pH	Complexo Sortivo							
	(cm)	(água)	K^+	P mg dm^{-3}	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+} $cmol_c$	Al^{3+} dm^{-3}	H + Al	P-REM mg/L
A1	0-30	5,1	102,3	0,1	15	4,4	1,1	0,5	4,9	16,5
A2	30-50	5	43,3	0,1	7	1,6	0,4	1	5,6	11,1
Bw	50-85+	5,2	31,4	0,1	6	1,9	0,6	0,3	3,4	8

SB	t $cmol_c$ dm^{-3}	T	V	m %	M.O	Zn	Fe	Mn	Cu mg dm^{-3}	B	S
5,3	5,8	10,2	52,1	8,6	3,2	1,3	34,1	20,5	0,8	0,1	1,5
2,1	3,1	7,7	27,5	32,1	1,6	0	24,1	8,1	0,7	0,0	2,2
2,6	2,9	6	42,9	10,5	1,3	0	20,6	5,7	0,5	0,0	0

Fração Grosseira			< 2mm				Cor úmida		CLASSE TEXTURAL		ATIVIDADE DA ARGILA
< 2mm	2 a 5mm	>5mm	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila					
%			(dag/kg)				===	===	===	===	cmolc/kg
44,5	17,2	38,3	30,9	19,3	3,6	46,2	7,5YR 4/2		Argilo-arenosa		
69,4	16,0	14,6	22,1	17,6	1,4	58,9	7,5YR 5/6		Argila		13,1
67,6	11,1	21,3	10,1	28,1	1,6	60,1	7,5YR 5/8		Muito argiloso		9,9

Fonte: Autor

Apêndice B - Fluorescência de raios-x (elementos traço)

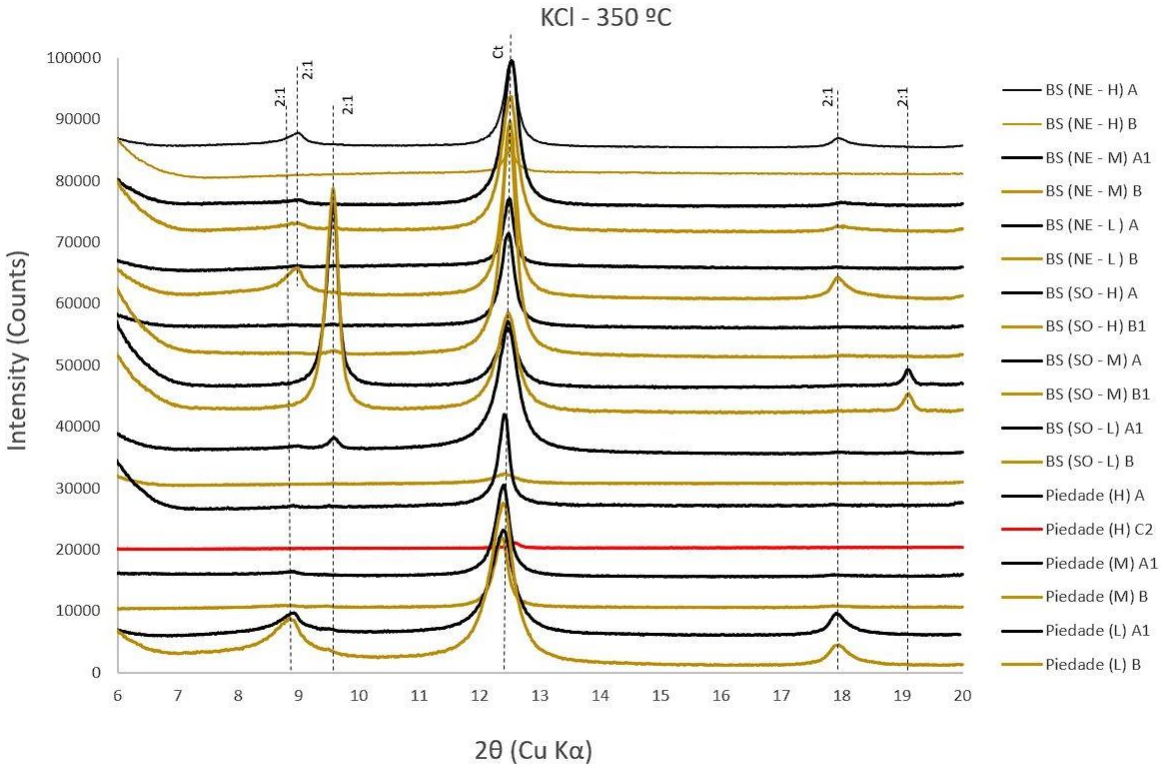
Perfil	Hor.	Gd_2O_3	Cl	CuO	V_2O_5	NiO	Rb_2O	As_2O_3	BaO	SrO	Br	Tb_4O_7	CoO	Ga_2O_3	Nb_2O_5	Eu_2O_3	CeO_2	Ho_2O_3	ZnO	Cr_2O_3
											PPM									
BOM SUCESSO (NE)	A	300	100	100	-	99	71	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	100
Terço superior	Bi	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58	70
-	BC	-	-	-	-	80	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	0	0
BOM SUCESSO (NE)	A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76	98
Terço médio	A2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54	100
-	Bi	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	100
BOM SUCESSO (NE)	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76	70
Terço inferior	B	-	-	100	100	-	74	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	0
BOM SUCESSO (SW)	A	-	200	61	400	-	-	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75	200
Terço superior	B	-	-	83	-	-	-	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58	200
-	Bw	-	-	68	500	-	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	200
BOM SUCESSO (SW)	A	-	100	100	-	84	-	54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89	0
Terço médio	B	-	-	93	200	-	-	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61	0
-	Bw	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71	82
BOM SUCESSO (SW)	A1	-	200	86	-	-	-	100	800	87	53	-	-	-	-	-	-	-	300	0
Terço inferior	A2	300	-	100	300	100	-	100	600	39	-	-	-	-	-	-	-	-	200	65
-	B	-	100	100	400	-	-	97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	67
-	Bw	-	-	-	-	500	-	63	0,0004	-	-	4	1	-	-	-	-	-	100	2800

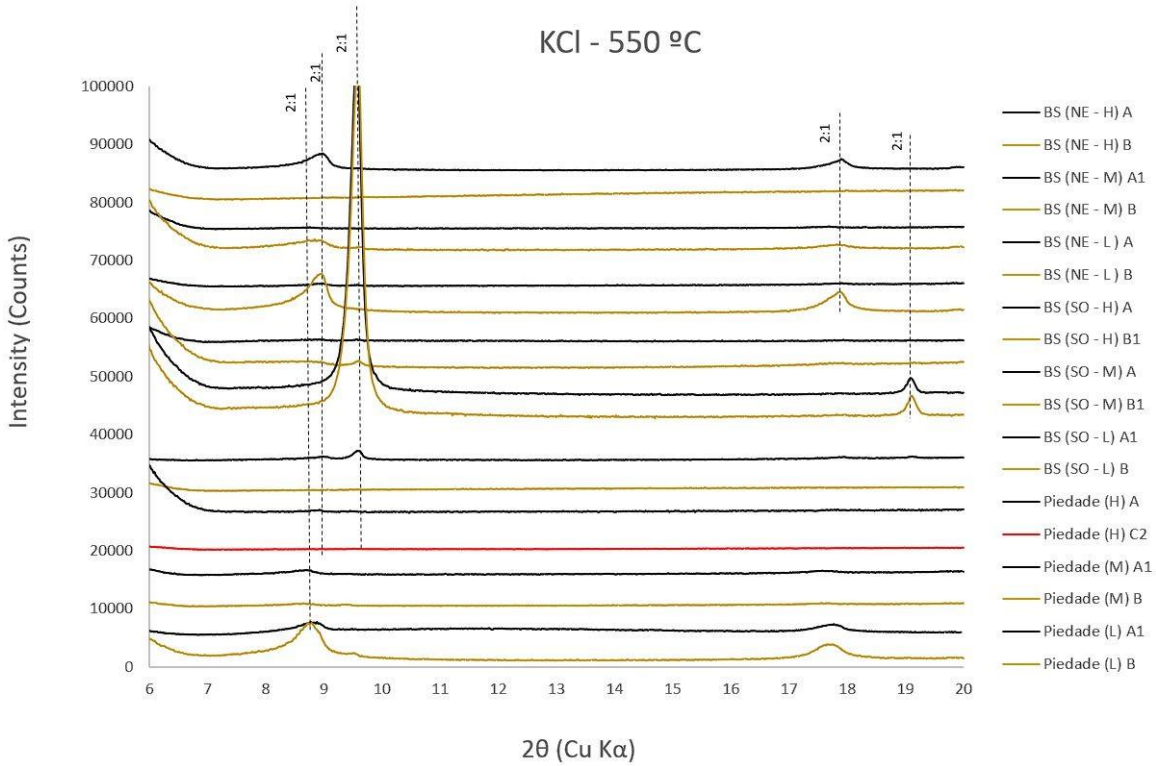
Continuação ...

Perfil	Hor.	Gd_2O_3	Cl	CuO	V_2O_5	NiO	Rb_2O	As_2O_3	BaO	SrO	Br	Tb_4O_7	CoO	Ga_2O_3	Nb_2O_5	Eu_2O_3	CeO_2	Ho_2O_3	ZnO	Cr_2O_3
											PPM									
PIEDADE	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
Terço superior	C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	0	0
-	C2	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
PIEDADE	A1	-	200	81	-	-	-	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	100
Terço médio	A2	500	100	-	-	-	-	-	-	-	35	-	-	-	-	-	-	-	52	200
-	Bwc	-	200	-	-	-	-	-	-	-	570	-	-	-	-	-	-	-	0	100
PIEDADE	A1	-	200	76	400	100	84	-	700	40	52	-	-	48	31	-	-	-	100	300
Terço inferior	A2	-	-	81	400	100	88	-	600	35	39	-	-	44	-	-	-	-	100	400
-	Bw	-	-	-	400	100	70	-	600	34	-	-	-	56	28	-	-	-	100	300
fragmentos de rocha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BS (NE) TERÇO SUP.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
BS (NE) TERÇO MED.	-	-	-	-	-	79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	100
BS (NE) TERÇO INF.	-	600	100	-	-	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	500
BS (SW) TERÇO SUP.	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	37	-	-	-	-	-	-	0	0
BS (SW) TERÇO MED.	-	-	-	-	-	-	-	62	800	-	-	58	-	-	-	300	300	200	72	0
BS (SW) TERÇO INF.	-	-	-	-	-	91	-	54	200	-	-	62	-	-	-	-	-	-	0	0
PIEDADE TERÇO SUP.	-	-	300	-	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	0	67
PIEDADE TERÇO MED.	-	200	-	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
PIEDADE TERÇO INF.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	-	-	-	-	-	-	0	0

Fonte: Autor

Apêndice C - Difração de raios-X da argila com tratamento térmico a 350 e 550ºC





Fonte: Autor