



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GEOLOGIA

ALICE DOS SANTOS CRUZ DIAS

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA
DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO DE MORRO DO
ENGENHO, EXTREMO OESTE DE GOIÁS.**

Salvador

2020

ALICE DOS SANTOS CRUZ DIAS

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA
DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO DE MORRO DO
ENGENHO, EXTREMO OESTE DE GOIÁS.**

Monografia apresentada ao Curso de Geologia,
Instituto de Geociências Universidade Federal
da Bahia como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Eduardo Moussalle Grissolia.

Co-orientador: MSc. André Azevedo Klumb
Oliveira.

Salvador

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

ALICE DOS SANTOS CRUZ DIAS

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA
DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO DE MORRO DO
ENGENHO, EXTREMO OESTE DE GOIÁS.**

Trabalho final de graduação aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em geologia, Universidade Federal da Bahia pela seguinte banca examinada:

1º Examinador – Dr^a. Maísa Bastos Abram - CPRM

2º Examinador – Dr^o. Edgar Romeo Herrera de Figueiredo Iza - CPRM

Salvador, 27 de novembro de 2020

Dias, Alice dos Santos Cruz Dias

Caracterização petrográfica e geoquímica do depósito de níquel laterítico de Morro do Engenho, extremo oeste de Goiás / Alice dos Santos Cruz Dias. - Salvador, 2020. – 126 f.

Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal da Bahia.
Curso de Geologia.

Orientador: Eduardo Moussalle Grissolia

Co-orientador: MSc. André Azevedo Klumb Oliveira

1. Níquel laterítico. 2. Lateritização. 3. Litoquímica. 4. Província Alcalina de Goiás. 5. Cobalto. I. Caracterização petrográfica e geoquímica do depósito de níquel laterítico de Morro do Engenho, extremo oeste de Goiás.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, que sempre me deu saúde e forças, me conduziu as lições de amor, fraternidade durante toda a vida.

Aos meus pais e família, que são minha base sendo essenciais em toda a caminhada, me sustentaram nas horas mais difíceis e felizes, me incentivam a ser uma pessoa melhor e não desistir desse sonho. A meu noivo pela compreensão e apoio em todos os fins de semana dedicados aos estudos e também pela atenção e incentivo demonstrados durante toda a graduação.

Aos meus professores do Instituto Federal da Bahia, Marcão, Renilda Lima, Ana Carolina e Priscila Gonçalves, que durante o ensino técnico, um ciclo prematuro de muitas risadas, choros e conquistas, me apresentaram a geologia com excelência em conhecimento e acreditaram no meu potencial para atuação nesse campo, e serviram de exemplo de amor a uma profissão

Aos professores da graduação, em especial, Henrique Assunção, Pedro Maciel, Jailma Souza, Angela Leal e Simone Cruz por todos os conselhos e ajuda durante os meus estudos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

Ao meu orientador Eduardo Grissolia e co-orientador André Klumb pelos ensinamentos e incentivo, pela paciência e horas de contribuição nas correções e discussões para esse resultado final. Espero poder contar sempre com a sabedoria de ambos.

Ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM que me forneceu uma bolsa de estágio e consequentemente propiciou toda a investigação que ocorreu durante a construção dessa monografia. Aos funcionários dessa empresa, sempre prestativos, em especial ao Rogério, Ritinha, Isabel, Brito e a Madalena.

Aos amigos Isadora e Vanessa Estrela, aos colegas do grupo formandos 2019/2020 que durante essa etapa tão importante da minha formação acadêmica foram imprescindíveis no trabalho em grupo e transformaram momentos tensos em momentos de alegria, em cada campo exaustivo, dia após dia, numa carga horária extensa permitiram as mais diversas resenhas que ficarão registradas carinhosamente.

A todos que acreditaram nesse sonho.

RESUMO

O depósito de níquel laterítico de Morro do Engenho está localizado na porção extremo oeste do estado de Goiás, e inserido na Província Alcalina de Goiás é caracterizado por uma intrusão máfica-ultramáfica de padrão zonado com idade Cretácea. As litologias que compõem a intrusão são sobrepostas por um espesso perfil regolítico, o qual contém importantes concentrações de níquel. Visando o estudo das variações mineralógicas e geoquímicas das zonas do perfil de intemperismo e o entendimento sobre a fase portadora do minério de níquel, o presente trabalho realizou o resgate de dados históricos disponíveis, o reconhecimento macroscópico e microscópico, através da descrição de furos de sondagem, além de novas análises petrográficas e químicas do material coletado. O tratamento dos dados proporcionou a individualização das zonas do perfil, descritas da base para o topo, da seguinte forma: rocha parental, saprólito, horizonte plasmático, duricrosta laterítica e solo. O horizonte plasmático, o qual é composto principalmente por argilas, foi responsável por atingir as maiores concentrações de níquel, de até 1,47%, em perfis desenvolvidos sobre os dunitos. Propõe-se que estes altos valores estejam associados às argilas, possivelmente esmectitas, as quais teriam atuado como armadilha para adsorção do níquel no depósito. A variabilidade espacial descrito pelos teores de Ni, MgO, MnO, Co e SiO₂ indicou uma menor mobilidade do Ni nas demais litologias estudadas, compostas por harzburgito e olivina-gabro, refletindo concentrações menos relevantes para este elemento, em média 0,2 a 0,4%.

Palavras-chave: Níquel laterítico. Lateritização. Litoquímica. Província Alcalina de Goiás. Cobalto.

ABSTRACT

The lateritic nickel deposit of Morro do Engenho is located in the extreme western portion of the state of Goiás, and inserted in the Alkaline Province of Goiás and characterized by a mafic-ultramafic intrusion of zoned pattern with Cretaceous age. The lithologies that make up the intrusion are superimposed by a thick regolytic profile, that hosts significant nickel concentrations. The objective of this study is to characterize the mineralogical and geochemical variations in the areas of the weathering profile as well as understanding the nickel ore carrier phase. This work carried out the rescue of available historical data, macroscopic and microscopic recognition through the description of drilling holes, along with new petrographic analysis and compounds of the collected material. The treatment of the data provided an individualization of the profile zones, described, from base to top, as follows: parental rock, saprolite, plasmatic horizon, lateritic duricrust and soil. The plasma horizon, which is composed mainly of clays, was responsible for reaching the largest nickel solutions, up to 1.47% in profiles developed on dunites. It is proposed that these high assigned values associated with clays, possibly smectites, which acted as a nickel trap in the deposit. The spatial variability of levels of Ni, MgO, MnO, Co and SiO₂ indicated a lower mobility in the other studied lithologies, composed of harzburgite and gabbro olivine, reflecting a less relevant nickel content, on average 0.2 to 0.4%.

Keywords: Lateritic nickel. Lateritization. Lithochemistry. Alkaline Province of Goiás. Cobalt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de Localização e acesso à área de pesquisa de Morro do Engenho (GO).....	18
Figura 2- Metodologia aplicada.....	23
Figura 3 - Malha de pesquisa executada no projeto Morro do Engenho pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM em 1972.	36
Figura 4 - Províncias alcalinas (círculos pretos) que bordejam a Bacia do Paraná condicionados pelos lineamentos 125°AZ marcado na linha contínua em azul, Lancinha-Cubatão traçado na linha contínua em laranja, além do Transbrasiliano (marcado pela linha pontilhada em cinza). Morro do engenho encontra-se em destaque (círculo vermelho)..	38
Figura 5 - Mapa Geológico da PAGO com as intrusões alcalinas devidamente enumeradas..	44
Figura 6 - Mapa Geológico da região de Morro do Engenho.....	45
Figura 7 - Mapa de Formações Superficiais de Morro do Engenho (GO) com as áreas de pesquisa do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em destaque..	47
Figura 8 - Distribuição e profundidade do solo e associação ao clima.....	50
Figura 9 - Distribuição dos principais processos de intemperismo na superfície da Terra..	53
Figura 10 - Localização dos mais importantes depósitos lateríticos do Brasil de Al, Mn, Fe, Ni, P e Nb..	54
Figura 11 - Esquema da estrutura interna de depósitos de Ni e Co garnieríticos (oxi-silicatados)..	55
Figura 12 - A zona mineralizada do perfil laterítico de Morro do Engenho..	60
Figura 13 - Diagramas de estabilidade de eH x pH a 25°C para Co.....	61
Figura 14 - Processo idealizado de formação de perfil laterítico-saprolítico..	62
Figura 15 - Variação de teores de Ni dados pela XRF no furo MC-81-GO..	68
Figura 16 - Variação de teores de Ni dados pela XRF no furo MC-130-GO..	69
Figura 17 - Variação dos teores de Co dada pela XRF no furo de rocha gabróica, MC-112-GO.	71
Figura 18 - Variação dos teores de Co dada pela XRF no furo de peridotito-piroxenito, MC-46-GO. 72	
Figura 19 - Mapa geológico de subsuperfície exibindo a distribuição dos furos de sondagem selecionados para estudo.	75
Figura 20 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-70-GO.....	77
Figura 21 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-53-GO.....	82
Figura 22 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-130-GO.	84
Figura 23 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-51-GO.....	86
Figura 24 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-81-GO	87
Figura 25 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-42-GO.....	89
Figura 26 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-135-GO.....	93
Figura 27 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-46-GO.....	95
Figura 28 - Amostras dos furos da zona dunítica, peridotito-piroxenítica plotadas no diagrama de classificação de peridotitos e piroxenito de Streckeisen.....	96
Figura 29 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-132-GO.....	99
Figura 30 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-112-GO.....	101
Figura 31 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-100-GO.....	103
Figura 32 - Classificação modal de rochas gabróicas baseada na proporção de plagioclásio, piroxênio e olivina de acordo com Streckeisen	104
Figura 33 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-108-GO.....	106
Figura 34 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o dunito serpentizado no furo MC-42-GO.....	109
Figura 35 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o serpentinito no furo MC-81-GO. Fonte: Da.....	110

Figura 36 - Perfil laterítico desenvolvido sobre serpentinito no furo MC-51-GO	111
Figura 37 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o peridotito-harzburgito no furo MC-46-GO	112
Figura 38 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o olivina-gabro no furo MC-100-GO.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requerimentos de pesquisa	34
Tabela 2 - Mobilidade geoquímica dos elementos durante o intemperismo laterítico	51
Tabela 3 - Resultado das análises químicas para rocha total e níquel laterítico realizadas para os furos selecionados.....	108

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1 - Disposição das amostras coletadas nos testemunhos de sondagem.	27
Foto 2 - Processo de serragem utilizado para amostras mais consolidadas (A e B), e para amostras mais friáveis (C e D).....	28
Foto 3 – Processo de serragem para produção de lâminas petrográficas. Fonte: Da autora (2019).	29
Figure 4 - Amostragem de rocha realizada manualmente, com destaque para as informações contidas nas caixas.....	29
Foto 5 - Balança de precisão utilizada na pesagem das amostras, modelo Bel S5201, com limite máximo de 5200 gramas e mínimo de 20 gramas	30
Foto 6 - Vedação dos sacos plásticos utilizando seladora para embalagens na foto A, e em B o resultado final da operação.....	30
Foto 7 - Preparação das lâminas delgadas	31
Foto 8 - Dunito descrito no furo MC-130-GO	63
Foto 9 - Peridotito-harzburgito descrito no furo MC-46-GO.	64
Foto 10- Dunitos do fronte de alteração descritos nos furos MC-81-GO e MC-130-GO, respectivamente.	64
Foto 11 - Sapolito desenvolvido sob o dunito descrito nos furos MC-53-GO e MC-130-GO	65
Foto 12 - Zona plásmica desenvolvida sob o dunito denotando a perda total das características da rocha-mãe, ambos do furo MC-51-GO.....	66
Foto 13 - Concreções ferruginosas desenvolvidas sob o dunito no furo MC-81-GO.....	66
Foto 14 - Solo laterítico desenvolvido sob o furo MC-42-GO.....	67
Foto 15 - Stockworks encontrado no furo MC-46-GO.....	70
Foto 16 - Asbolano encontrado nas fraturas do furo de gabro MC-100-GO.....	73
Foto 17 - Textura lenticular preta composto por asbolano descrito no furo gabróico MC-100-GO	73
Foto 18 - Dunito pouco intemperizado de coloração cinza-esverdeado com vênulas de garnierita.....	80
Foto 19 - Amostra de rocha gabroica de coloração cinza esverdeado, fanerítica média	98
Foto 20 - Características dos lateritos encontrados	107

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

Fotomicrografia 1 - Quarzito com grãos de quartzo (qz) uniformemente distribuídos, sem qualquer orientação	78
Fotomicrografia 2 - Rocha básica intensamente intemperizada	79
Fotomicrografia 3 - Núcleos de olivina (Ol) ainda preservados com suas bordas serpentinizadas. Vênulas de carbonato (Cb) encontram-se em destaque na lâmina	90
Fotomicrografia 4 - Xenomorfos de magnetita (Mag) associados às serpentinas. Vênulas de carbonato (Cb) também são encontrados	91
Fotomicrografia 5 – Pseudomorfos de olivina intensamente serpentinizados (Srp)	91
Fotomicrografia 6 - Vênulas de talco (Tlc) distribuídas de forma irregular.....	97
Fotomicrografia 7 - Olivinas (Ol) intensamente fraturadas e serpentinizadas. Além de magnetita (Mag) nos intercumulus como também inclusos em outros minerais	97
Fotomicrografia 8 - Cristais de plagioclásio (Pl) anédricos, bastante fraturados e geminados segundo a lei albita	104
Fotomicrografia 9 - Muscovita (Ms) no centro dos nicóis encontra-se deformada mas de possível identificação devido principalmente a extinção olho de pássaro.....	105

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	15
1.1 INTRODUÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 LOCALIZAÇÃO, VIAS DE ACESSO E INFRAESTRUTURA.....	18
1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS.....	20
1.4.1 Clima.....	20
1.4.2 Vegetação.....	20
1.4.3 Geomorfologia.....	20
1.4.4 Hidrografia.....	21
1.4.5 Pedologia.....	22
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
1.5.1 Inventário dos dados disponíveis.....	24
1.5.2 Trabalho de campo – Litoteca de Caeté (MG).....	25
1.5.3 Pós - campo.....	32
1.5.4 Resultados e Conclusões.....	33
2. TRABALHOS ANTERIORES.....	34
3. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOTECTÔNICO DA REGIÃO.....	38
▪ EMBASAMENTO.....	39
a) Complexo Granitoide-Gnáissico.....	39
b) Sequências Metavulcanossedimentares.....	40
c) Grupo Cuiabá.....	40
d) Magmatismo granítico e máfico-ultramáfico sin a pós-orogênico.....	40
▪ BACIA DO PARANÁ.....	41
a) Formação Furnas.....	42
▪ PROVÍNCIA ALCALINA DE GOIÁS.....	43
▪ CAPEAMENTO SILICIFICADO.....	46
▪ COBERTURA LATERÍTICA.....	46
▪ ALUVIÕES.....	47
3.1 SÍNTESE DO ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	48
4. GÊNESE DOS DEPÓSITOS LATERÍTICOS: ESTADO DA ARTE.....	49

▪ DEPÓSITOS RESIDUAIS E SUPERGÊNICOS GARNIERÍTICOS OU OXI-SILICATADOS DE NÍQUEL E COBALTO	54
4.1 MINERALIZAÇÃO DO DEPÓSITO DE MORRO DO ENGENHO	57
▪ GÊNESE DO DEPÓSITO DE MORRO DO ENGENHO	57
▪ EVOLUÇÃO DO PERFIL LATERÍTICO	58
5. RESULTADOS	62
5.1 ASPECTOS DO PERFIL LATERÍTICO DE MORRO DO ENGENHO	62
a) Zona mineralizada	67
▪ Níquel.....	67
▪ Cobalto.....	70
5.2 DESCRIÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM E PETROGRAFIA	74
I) PALEOZOICO	75
▪ Formação Furnas (Rocha encaixante).....	75
• MC-70-GO.....	76
II) MESOZOICO.....	79
▪ Província Alcalina de Goiás	79
a) Zona dunítica.....	79
• MC-53-GO.....	80
• MC-130-GO	84
• MC-51-GO.....	85
• MC-81-GO.....	87
• MC-42-GO.....	88
b) Zona peridotito-piroxenítica.....	91
• MC-135-GO	92
• MC-46-GO.....	93
c) Zona gabroica.....	97
• MC-132-GO	98
• MC-112-GO	10
0	
• MC-100-GO	102
d) Zona sienito-nefelínica.....	105
• MC-108-GO.....	105
III) TERCIÁRIO-QUATERNÁRIO	106
a) Cobertura laterítica.....	106

6. DISCUSSÕES	108
6.1 ANÁLISES QUÍMICAS	108
6.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA.....	114
6.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	115
6.4 COMPORTAMENTO E MOBILIDADE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS.....	116
6.5 ANÁLISE QUÍMICA E AS DIFERENTES LITOLOGIAS	117
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

O depósito de níquel laterítico de Morro do Engenho está localizado na porção extremo oeste do estado de Goiás. Está inserido na Província Alcalina de Goiás, posicionada no cruzamento do lineamento 125° AZ, o qual controla a ocorrência de um grande número de complexos alcalinos-carbonáticos, com o lineamento Transbrasiliano.

Possui estrutura ovalada com um núcleo dunítico parcialmente serpentinizado, circundado por uma zona peridotito-piroxenítica, uma zona gabroica e mais externamente por uma zona nefelino-sienítica, caracterizando o padrão zonado de acordo com Biondi (2003, p.404). Essas litologias são sobrepostas por manto de intemperismo formado por perfil laterítico espesso com teores elevados de níquel (Ni).

Para Costa (2008), o solo laterítico resultante de processos de lateritização, associados ao intemperismo em paleoclima tropical a partir de qualquer tipo de rocha exposta à superfície. Assim, minerais primários tornam-se instáveis às condições de superfície e se reorganizam para formarem minerais mais estáveis, em uma fase residual. Esta fase residual é composta pelos minerais primários residuais e secundários, denominados neformados ou transformados. Os lateritos podem ser importantes hospedeiros para depósitos econômicos de Ni, Al, Fe, Cu e Co, dentre outros. As níquelíferas, por exemplo, são produto da lateritização das rochas ricas em magnésio (Mg) ou ultramáficas, em geral, dunitos, harzburgitos e peridotitos. Esse processo de lateritização, controlados pela dinâmica de fatores como clima, topografia, tectônica, rocha primária e tempo, pode resultar em concentrações de 3 a 30 vezes o conteúdo de níquel e cobalto da rocha parental (Elias, 2002).

No Brasil, as condições climáticas tropicais, com as oscilações semiáridas que ocorreram no Cretáceo, além da estabilidade tectônica e o embasamento geológico construído do Arqueano ao Mesozoico, resultaram na formação de diferentes depósitos lateríticos, muitos ainda pouco estudados.

Segundo Radaelli (2000), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), reconhecendo o potencial para depósitos de enriquecimento supergênico no extenso capeamento laterítico mensurados na área, solicitou o requerimento de pesquisa na área de estudo. Este órgão construiu acervo bibliográfico de suma importância para o presente trabalho.

Os dados disponibilizados pela empresa, bem como o conhecimento fundado da importância econômica das intrusões alcalinas, contexto no qual Morro do Engenho está inserido e a potencialidade do depósito, não somente para o níquel, como também para o cobalto, são as justificas técnico-científicas que impulsionaram o desenvolvimento desta pesquisa. Segundo Fonte Boa (2018), ambos os metais, estão ganhando cada vez mais destaque e adquirindo um papel estratégico no mercado mundial graças aos avanços tecnológicos na indústria do aço inoxidáveis, incorporados também na produção de ligas especiais e baterias.

De acordo com Oliveira (1990) os depósitos de níquel laterítico podem ser divididos em duas zonas: zona limonítica ou oxidada, encontrada na porção superior do perfil, formada essencialmente por óxidos e hidróxidos de ferro, com baixo teor de magnésio e sílica. Pode abrigar cerca de 1 a 2% de níquel, estando este presente na estrutura da goethita e cromita, onde também são comumente encontrados caulinita, hematita e gibbsita; já a zona silicatada ou saprolítica, localizada na porção inferior do perfil, mais próxima à rocha-mãe, normalmente apresenta teores de 1,5 a 2,5% de níquel, sendo composta essencialmente por silício e magnésio. O níquel pode estar presente em minerais como serpentina, clorita e argilominerais.

A reavaliação petrográfica e geoquímica do depósito de Morro do Engenho, a partir de ferramentas atuais, permitiu reconhecer o comportamento e mobilidade dos principais elementos e óxidos nas litologias máficas e ultramáficas, bem como a variabilidade espacial dos teores de níquel (Ni) e cobalto (Co) mensurados com uso de fluorescência de raios-x portátil e química de rocha total. Assim, com as técnicas de interpretação dos dados processados usando tabelas e gráficos, os horizontes do perfil laterítico foram caracterizados do topo para a base. Além disso, foi proposta uma tipologia para o depósito, correlacionando-o com outras principais tipologias existentes no mundo, como Nova Caledonia, Murrin Murrin, na Austrália, e Moa Bay, em Cuba e no Brasil, Niquelândia, Santa Fé, em Goiás, e Vermelho (PA), Onça-Puma (PA).

Desta forma, ao somar a evolução do conhecimento científico a cerca dos depósitos lateríticos niquelíferos, com o atrativo valor de mercado de ambos os bens minerais, Ni e Co, e a importância destes na indústria, os modelos dos perfis de alteração aqui desenvolvidos, como resultado final do objeto de trabalho, agregam ainda mais valor ao depósito de Morro

do Engenho, fornecendo subsídios a novas pesquisas que irão contribuir com o maior entendimento da gênese e fases minerais portadoras do minério.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização das variações mineralógicas e químicas relativas aos diferentes estágios de evolução do perfil de intemperismo e o entendimento sobre a fase portadora do minério de níquel no depósito de Morro do Engenho.

1.2.2 Objetivos Específicos

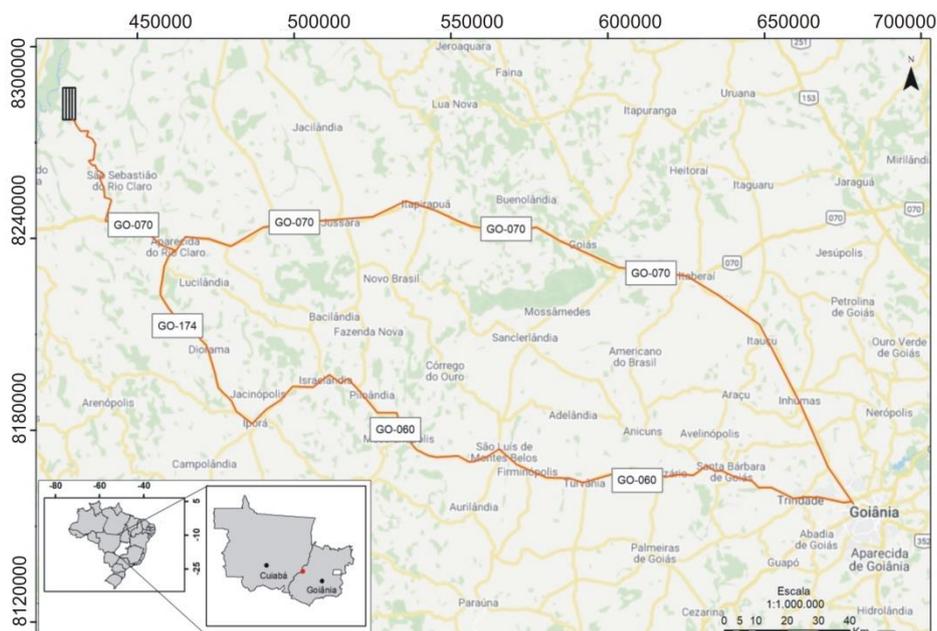
- Resgatar de dados históricos do projeto Morro do Engenho;
- Caracterizar as litologias por meio de novas descrições macroscópicas e microscópicas dos furos de sondagem, determinando as variações mineralógicas e químicas das fases do perfil de regolito;
- Definir a variabilidade espacial dos teores de Ni, Co, Fe, Al e Mg, dentre outros elementos relacionados aos processos de enriquecimento supergênico.

1.3 LOCALIZAÇÃO, VIAS DE ACESSO E INFRAESTRUTURA

A área de estudo está localizada no extremo oeste do estado de Goiás (GO), próximo ao limite geográfico com Mato Grosso (Figura 1), praticamente às margens do rio Araguaia e na sua convergência com o tributário rio Claro. A localidade denominada Morro do Engenho, dista cerca de 75 quilômetros, no sentido noroeste do município de Jussara.

A partir da capital Goiânia, o acesso rodoviário pode ser realizado de duas maneiras distintas (Figura 01). A primeira, percorrendo um trecho asfaltado pela rodovia GO-070 de 357 quilômetros, passando pelo município de Jussara. A segunda possibilidade de acesso se dá através do percurso via GO-060 até a cidade de Iporá, seguido por trecho da GO-174 e por fim, tomando a GO-070 em Aparecida do Rio Claro, até o destino final, totalizando 368 quilômetros. O acesso local à área de estudo é realizado através de estrada sem pavimentação, num trecho de 50 quilômetros.

Figura 1- Mapa de Localização e acesso à área de pesquisa de Morro do Engenho (GO). A área está indicada no noroeste da imagem, e as rodovias intituladas foram marcadas em vermelho, a partir da capital Goiânia. Fonte: IBGE (2017).



O núcleo urbano mais importante, nas proximidades da área de estudo, é o município de Jussara, no estado de Goiás, distante cerca de 226 quilômetros da capital Goiânia. Outros de menor porte também devem ser citados, como Iporá e Santa Fé. A região conta com rede de energia elétrica, com subestações e linhas de transmissão compatíveis. Já em Mato Grosso,

o município de Barra do Garças, distante cerca de 152 quilômetros da área de estudo via GO-070, representa também um relevante centro urbano na região.

A principal atividade econômica da região compreende a criação de gado zebuíno, em especial da raça Nelore, abrangendo extensas áreas de pastagens, principalmente ao longo das calhas do rio Araguaia.

1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

1.4.1 Clima

O clima da região, classificado como Aw, segundo Koppen *apud* Alvares *et al.* (2013), correspondente ao tropical de savana, marcado por uma estação chuvosa (primavera-verão) e uma estação seca (outono-inverno). A precipitação anual varia entre 1300 milímetros e 1750 milímetros, sendo a média pluviométrica mensal de 130 milímetros. Cerca de 45 a 55% da precipitação anual ocorre no verão e de janeiro a março, a concentração média de precipitação atinge 224 milímetros. Já nos períodos de seca, a estiagem costuma ser vigorosa, com chances mínimas de chuva nos meses de julho e agosto, não chegando a ultrapassar 20 milímetros (INMET, 2019).

A variação anual de temperatura é mínima, alcançando 18°C no mês mais frio e 23°C no mês mais quente. Nas áreas das chapadas sedimentares com elevadas altitudes, a temperatura média anual oscila entre 20°C e 22°C.

1.4.2 Vegetação

Seguindo o caráter de classificação do manual técnico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), grande parte da região pertence ao domínio fitogeográfico savana (cerrado). Sua fisiografia apresenta árvores de pequeno porte, retorcidas e dispersas em vegetação de gramínea. Por outro lado, nas quebras de chapada e sob os corpos ígneos máficos e ultramáficos, desenvolve-se uma mata de grande porte. Localmente, são observadas as matas ciliares que acompanham as drenagens, possuindo poucos metros de largura e caracterizadas pela abundância de palmeiras buriti (Chaban *et al.*, 1975). De acordo com Ianhez *et al.* (1983, p. 589), a cobertura vegetal nativa foi, em sua maioria, descaracterizada graças ao desmatamento, na qual grandes extensões de área do cerrado foram substituídas por áreas de plantações e pastagens.

1.4.3 Geomorfologia

De acordo com o Ianhez *et al.* (1983, p. 373), observa-se na área de estudo, a classificação do Planaltos Setentrional da Bacia Sedimentar do Paraná, que representa a unidade dos residuais da borda setentrional da mesma, apresentando cotas altimétricas de até 160 metros e topos convexos que foram dissecados de forma diferencial. Possuem uma grande densidade de drenagem que atua por erosão regressiva, exumando as camadas subjacentes e originando assim um relevo particular. O Ciclo das Velhas, definido por King (1956), de idade Terciário

inferior, foi responsável pelo aplainamento da região, contudo o Morro do Engenho permaneceu como testemunho devido à alta silicificação que permitiu sustentar o relevo.

Ainda segundo Ianhez *et al.* (1983, p. 373), também foram identificadas as Superfícies Adjacentes aos Planaltos Setentrionais da Bacia Sedimentar do Paraná representado pelo Arco de Torixoréu – Montes Claros Goiás. Trata-se de uma categoria homogênea tabular, com o modelo de dissecação homogênea ou diferencial e densidade de drenagem baixa. O topo em geral é tabular. Por fim, ocorrem os Depósitos Sedimentares Quaternários, com planícies e terraços fluviais em um modelo de acumulação fluvial, no qual, a fonte principal são os arcos máficos e ultramáficos.

1.4.4 Hidrografia

▪ Águas Superficiais

O sistema hidrográfico da região é pertencente à Bacia Amazônica, situada no alto curso da Sub-Bacia do Rio Araguaia (Ianhez *et al.* 1983, p. 27). Estes cursos d'água mostram áreas de inundação que atingem até 4 quilômetros em suas margens. O padrão em geral é meândrico, originando assim diversos braços abandonados (Chaban *et al.*, 1975).

▪ Água Subterrânea

De acordo com o mapa hidrogeológico do Brasil (CPRM, 2014), foi possível identificar os aquíferos principais que determinam o contexto das áreas estudadas descritas abaixo.

1) Depósitos aluvionares (Qa) - Aquífero granular que chega a 10 metros de espessura média e com produtividade baixa;

2) A Formação Araguaia (Qag) - Composta por areia, argila, silte, arenito e conglomerado. É um aquífero granular, com espessura baixa de 1 a 5 metros e baixo grau de fraturamento. A produção varia de muito baixa a localmente baixa;

3) Embasamento fraturado indiferenciado (Fr) - Rochas vulcânica, metavulcânica, metassedimento. Aquífero de caráter fraturado de grau baixo e com produtividade baixa.

1.4.5 Pedologia

Os solos estão correlacionados diretamente ao seu substrato rochoso. Assim, podem ser observados os seguintes domínios pedológicos de acordo com a classificação do IBGE (2007).

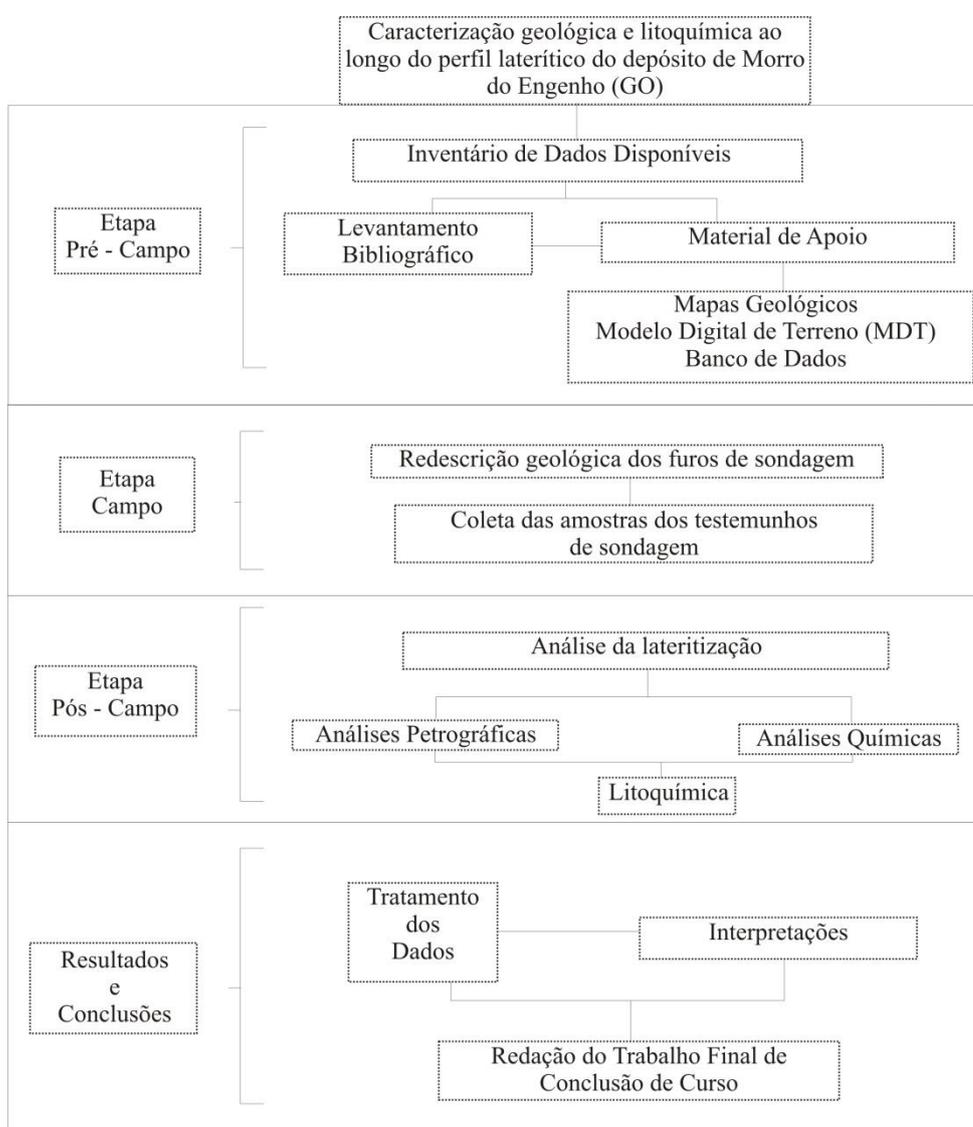
- Gleissolo que são solos minerais, hidromórficos, desenvolvidos sobre sedimentos recentes não consolidados, compostos por argila, argilo-arenosa, areia, e associados ao Holoceno. Variam de mal a muito mal drenados. Em geral, apresentam coloração acinzentada com mosqueados amarelos ou avermelhados, oriundos do processo de oxi-redução.
- Os Plintossolos Pétricos que apresentam drenagem moderada com tons em geral avermelhados. Apresentam uma forte presença de concreções ferruginosas, dando certas limitações quanto ao seu uso, pois dificulta o desenvolvimento de raízes para as plantações.
- Latossolo os quais são desenvolvidos principalmente sob as unidades do piroxenito e gabro e, em geral, apresentam cor vermelho intenso, por vezes ondulados. Além disso, são caracterizados pelo desenvolvimento de perfis espessos.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização geológica e litoquímica permite a determinação da disposição dos elementos ao longo do perfil laterítico, por meio de análise química de amostras coletadas desde a rocha sã até o topo do perfil.

A seguir, serão descritas as atividades (Figura 02) que compõem cada uma das quatro etapas realizadas durante o trabalho: pré-campo, campo, pós-campo, além dos resultados e conclusões.

Figura 2- Metodologia aplicada.



1.5.1 Inventário dos dados disponíveis

- Levantamento Bibliográfico

Inicialmente, esta pesquisa envolveu uma revisão bibliográfica referente a área de estudo e seu entorno, abrangendo: contexto geológico, condicionantes da mineralização, depósitos análogos, tipos de minérios e teores de corte. As principais fontes de informações utilizadas foram: o acervo do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, referente aos relatórios de pesquisa (parciais e finais) executados pela empresa na região de estudo na década de 70; dissertações de mestrado, teses de doutoramento, trabalhos finais de graduação e artigos científicos.

- Material de apoio

- I) Mapas Temáticos

Foram utilizados, principalmente, os mapas em escala 1:10.000, produzidos pelas pesquisas do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, e apresentados no Relatório Final de Pesquisa da empresa (CHABAN *et al.*, 1975). São eles: mapas topográfico, geológico de superfície, geológico de subsuperfície, de isópacas de cobertura e da área mineralizada com teores > 0,80% Ni, de curvas de isoteores de geoquímica, de cubagem (*cut-off* 0,80% Ni), de cubagem (*cut-off* 1,10% Ni). Estes mapas foram convertidos do meio analógico para o digital e georreferenciados, com apoio do *basemap* no *software* ARCGIS 10.5.

- II) Modelo Digital de Terreno

Para análise do relevo foi utilizado um produto de modelo digital de terreno (MDT) originário da missão de mapeamento do relevo terrestre *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

- III) Banco de Dados

Foram resgatados os dados históricos produzidos pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM durante as pesquisas na década de 70, contendo dados estruturais, dados de poços, trincheiras e furos de sonda, descrições petrográficas, boletins de resultados analíticos e boletins de descrição de testemunhos de sondagem. O processo de aquisição dos registros gerou um banco de dados no *software Excel* 2010 com 166 poços, 162 furos de sondagem e 5 trincheiras agrupados em 3 temas que, em comum, apresentam a nomenclatura dada no projeto: *Collar*, contendo as coordenadas (X,Y,Z) dos furos em UTM (*Universal Traversa de Mercator – datum: WGS 1984, zona 22*); *Geology*, com a descrição geológica dos intervalos

perfurados; *Assay*, com os dados de análises químicas realizadas nas pesquisas para Ni, Nb, Ti, P₂O₅, Fe₂O₃, MgO, SrO₂, Co e Cr.

De posse dos dados organizados e com o conhecimento do Sistema de Informação Geográfica (SIG), estes foram referenciados espacialmente. Nem todos os resultados extraídos dos relatórios foram passíveis de georreferenciamento.

1.5.2 Trabalho de campo – Litoteca de Caeté (MG)

- Redescrição geológica dos furos de sondagem

A partir do levantamento geológico realizado anteriormente, foi elaborado um plano de investigações a fim de buscar uma melhor caracterização geológica do Complexo Morro do Engenho. Assim, foi realizada uma visita técnica a litoteca do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, localizada em Caeté, Minas Gerais, onde estão armazenados 159 furos de sondagem, de um total de 162 furos executados no projeto.

Atualmente, a litoteca abriga os testemunhos de 159 furos de sondagem, de um total de 162 furos executados no projeto. Os furos de sondagem apresentam boas condições de conservação, estando acondicionados em caixas de polietileno, ordenados da esquerda para direita, de baixo para cima, com os registros de metragem perfurada preservados. Todas as caixas possuem identificação do nome do projeto, código do furo, bem como informações acerca das medidas de manobra (profundidade atingida, intervalo, diâmetro e o tipo de sondagem utilizada).

Foram selecionados doze furos para a descrição completa, utilizando como critérios as boas condições de preservação dos testemunhos, aliado à uma maior abrangência das diferentes litologias para um maior conhecimento geológico da área. Todas as caixas estavam devidamente identificadas com o nome do projeto, código do furo, bem como informações acerca das medidas de manobra (profundidade atingida, intervalo, diâmetro e o tipo de sondagem utilizada). A relação completa dos furos selecionados é composta por: MC-53-GO, MC-130-GO, MC-51-GO, MC-81-GO, MC-42-GO, MC-135-GO, MC-46-GO, MC-132-GO, MC-112-GO, MC-100-GO, MC-70-GO, MC-108-GO.

Com posse do boletim de sondagem e régua, os avanços e recuperações foram checados, buscando-se uma validação dos dados. Assim, foi produzida uma descrição geológica ordenada da esquerda para direita, de baixo para cima, observando os critérios de cor, tamanho dos cristais, grau de alteração, teor de argila, composição mineralógica,

fraturamento e grau de magnetismo. Também foi utilizada a lupa de mão “*Triplet*” com aumento de 10x para melhor caracterização dos minerais presentes e caneta magnética. Desta forma, as descrições geológicas obedeceram às variações litológicas e dos respectivos horizontes do regolito. Além disso, durante a observação de cada intervalo proposto, foi feito um levantamento com equipamento portátil de fluorescência de raios-x, modelo Delta Dynamic XRF – Standard, previamente conforme manual do equipamento, a fim de detectar previamente os maiores teores e também averiguar a mineralogia diagnosticada. Em casos de intervalos muito espessos, duas a três medidas foram tomadas. Foi produzido um registro fotográfico de todas as caixas de testemunhos do projeto, em grupos de duas ou três, buscando não só auxiliar os estudos geológicos subsequentes, como também assegurar a correta movimentação dos testemunhos em operações futuras.

- Coleta de amostra dos testemunhos

Para a garantia da melhor representatividade das diferentes litologias, a escolha dos furos e dos respectivos intervalos a serem amostrados, considerou-se critérios como maior alcance de profundidade (buscando amostras da rocha parental fresca), perfil laterítico bem desenvolvido e preservação dos intervalos e, integridade dos testemunhos. Assim, houve a coleta das amostras de 7 furos, totalizando 46 amostras, nos seguintes furos: MC-100-GO, MC-108-GO, MC-42-GO, MC-46-GO, MC-51-GO, MC-70-GO, MC-81-GO. As amostras foram encaminhadas para análises químicas no laboratório da SGS GEOSOL. Além disso, desenvolveu-se nos mesmos intervalos a amostragem para confecção de lâminas petrográficas.

A amostragem foi realizada respeitando-se os limites geológicos delimitados durante a descrição dos testemunhos, considerando-se as quebras litológicas e pedológicas, além do grau de fraturamento, na tentativa de obter plausíveis informações para caracterizar os perfis lateríticos desenvolvidos e suas diferentes zonas até a rocha parental fresca ou semi intemperizada (Foto 1).

Foto 1 - Disposição das amostras coletadas nos testemunhos de sondagem. Fonte: Da autora (2019).



Os materiais utilizados foram: pá de alumínio, sacos plásticos específicos para amostragem de rochas e/ou sedimentos, identificados com logo do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, serra diamantada, além de etiquetas de papel na parte externa, devidamente protegidas para evitar avarias durante o manuseio das amostras. Nas etiquetas foram inseridos os números de laboratório de cada amostra.

Os testemunhos foram serrados (Foto 2) longitudinalmente em duas metades (meia cana) e posteriormente, uma das metades novamente serrada ao meio (1/4 de cana), (Foto 3) para produção de lâminas petrográficas. Testemunhos de rochas muito friáveis e/ou com intenso fraturamento, não permitiram a serragem e deste modo, os fragmentos do intervalo foram coletados manualmente (Foto 4) ou com auxílio de uma pá de alumínio, devidamente lavada entre uma amostragem e outra. Cerca de 300 gramas de amostra foram coletadas para cada intervalo definido na descrição geológica. Ao final, todas as amostras foram pesadas individualmente, com auxílio de balança de precisão (Foto 5), modelo Bel S5201, e devidamente vedadas com seladora manual para embalagens (Foto 6).

Foto 2 - Processo de serragem utilizado para amostras mais consolidadas (A e B), e para amostras mais frágeis (C e D). Fonte: Da autora (2019).



Foto 3 – Processo de serragem para produção de lâminas petrográficas. Fonte: Da autora (2019).



Figure 4 - Amostragem de rocha realizada manualmente, com destaque para as informações contidas nas caixas. Fonte: Da autora (2019).



LITOTECA REGIONAL DE CAETÉ		
TESTEMUNHO DE SONDAGEM		
PROJETO: MORRO DO ENGENHO		
C. CUSTO:	FURO:	DIÂMETRO:
INTERVALO:	TIPO:	
ESTANTE:	PRATELEIRA:	CAIXA:

Foto 5 - Balança de precisão utilizada na pesagem das amostras, modelo Bel S5201, com limite máximo de 5200 gramas e mínimo de 20 gramas. Fonte: Da autora (2019).



Foto 6 - Vedação dos sacos plásticos utilizando seladora para embalagens na foto A, e em B o resultado final da operação. Fonte: Da autora (2019).



As amostras coletadas em campo foram entregues ao Laboratório de Apoio e Preparação de Amostras de Material Geológico do Serviço Geológico do Brasil - CPRM (Rede de Laboratórios de Análises Minerais – Rede LAMIN) na superintendência de Salvador, previamente identificadas, para confecção de lâminas delgadas. Primeiramente, foram serradas com serras diamantadas (Foto 7-A, B), em seguida houve a preparação das

lâminas de vidro, onde fixaram-se as amostras. Posteriormente, as lâminas foram polidas na face oposta com abrasivo (Foto 7-C) e levadas à secagem na estufa (Foto 7-D) numa temperatura máxima de 50°C, em um tempo variável de 24 a 48 horas. Enquanto isso, a resina era preparada (Foto 7-E) e após a secagem utilizada para colar lâmina e vidro, procurando eliminar as bolhas de ar, novamente postas em estufa por cerca de uma hora. Depois, retirou-se o material e a lâmina foi posta num suporte (Foto 7-F) a fim de endurecer a cera e aprimorar a fixação. Logo após, desbastou-se a lâmina na serra diamantada, passando o esmeril (220) para obter a transparência. O acabamento final foi feito a mão em uma placa de vidro, no esmeril de 600, 800 e 1200.

Foto 7 - Preparação das lâminas delgadas: A e B - Serragem das amostras de campo, C – Polimento das lâminas, D- Estufa utilizada para a secagem, E- Preparação da resina, F – Lâmina presa ao suporte. Fonte: Da autora (2020).



As amostras foram condicionadas em caixas e registradas em ordem numérica sequencial para posteriormente serem enviadas para o laboratório da SGS GEOSOL.

Buscando um controle de qualidade dos resultados das amostras, a SGS GEOSOL promoveu um QA/QC interno para análises químicas, inserindo a cada 20 metros amostras duplicatas, replicatas e, em intervalos de 40 em 40 amostras, foram dispostos os brancos de preparação.

1.5.3 Pós - campo

Após o trabalho de campo, todos os dados coletados foram condicionados em um banco de dados no *software Excel* 2010. Informações como: nome dos furos, intervalos analisados, nome do laboratório, intervalos laminados, peso da amostra coletada em gramas, descrição geológica completa e dados da fluorescência de raios-x portátil (XRF), foram organizados a fim de sistematizar as etapas posteriores.

- Análise Petrográfica

De posse das 46 lâminas petrográficas dos sete furos anteriormente selecionados (MC-51-GO, MC-81-GO, MC-42-GO, MC-46-GO, MC-100-GO, MC-70-GO, MC-108-GO), a etapa posterior foi desenvolvida em com suporte essencial do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, por meio do Laboratório de Análises Mineraias (LAMIN), unidade Salvador. A análise das lâminas delgadas teve como objetivo descrever e classificar as rochas em microscópio de luz polarizada, de acordo com as características estruturais, texturais e mineralógicas das mesmas. A pesquisa foi executada com o uso do microscópio trinocular de alta qualidade da marca Olympus modelo BX51.

- Análises Químicas

As 46 amostras de rocha enviadas para a SGS-GEOSOL na unidade de Vespasiano, Minas Gerais, foram analisadas em seu espectro multielementar completo, por meio da digestão por água régia, multiácida e metaborato de lítio determinadas por leitura de ICP-OES/ICP-MS. Para determinação por digestão por água régia foram analisados os seguintes elementos: As, Bi, Ge, Hg, In, Sb, Re, Se, Ti, Te. Já a determinação por digestão multiácida, analisou elementos como o Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sc, Zn. Com o metaborato de lítio, foram estudados o Ba, Cr₂O₃, Sr, V, Zr. Essa inspeção contou com a preparação do testemunho por secagem, britagem de 75% a 3 milímetros, homogeneização, quarteamento em Jones, pulverização de 250 a 300 gramas de amostras em moinho de aço 95% a 150 #. Em

seguida, houve a fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF. Sua perda ao fogo por calcinação da amostra variou de 405° e/ou 1000°C.

Em 3 amostras, sendo duas correspondentes ao furo MC-42-GO e uma ao MC-81-GO, o limite máximo de detecção do níquel foi superado no método anterior, por isso solicitou-se um pacote analítico dedicado ao níquel laterítico, no qual incluiu elementos como: Co, Cu, Ni, e óxidos como: PbO, ZnO, Cr₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, K₂O, MnO. A fusão ocorreu com tetraborato de lítio e quantificação por XRF, e a perda ao fogo por calcinação da amostra variou 405°C e/ou 1000°C.

1.5.4 Resultados e Conclusões

IV) Tratamentos estatísticos dos dados geoquímicos

Com a matriz de dados criada no *Excel* 2010 houve a geração dos gráficos geoquímicos. Além disso, o *software GCDkit 6.0* também foi utilizado a fim de se adquirir o cálculo geoquímico padrão nas análises de rochas ígneas e montar os diagramas com saída gráfica de qualidade.

V) Interpretação dos resultados

Após o tratamento dos dados, e as devidas discussões sobre os resultados apresentados, o *software CorelDRAW X5* foi utilizado para montagem das figuras dos perfis lateríticos juntamente com os gráficos geoquímicos.

VI) A redação do trabalho de conclusão de curso foi feita em formato de monografia.

2. TRABALHOS ANTERIORES

A evolução do conhecimento científico sobre a área advém da compilação de dados e informações, obtidas por meio de levantamento dos trabalhos de pesquisa previamente, bem como os trabalhos executados pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM. A região do projeto Morro do Engenho foi observada pela empresa pela primeira vez em fotografias aéreas no ano de 1970. Seguiu-se, então, com a etapa de campo, na qual se demonstrou tratar-se de rochas ultramáficas alcalinas, especificamente dunito intemperizado, silicificado e serpentinizado, com capeamento laterítico, além também da presença de sienito com baixo grau de alteração (Chaban et al., 1975).

Em 1971 foram solicitados os pedidos de pesquisa para 9 áreas, mas apenas quatro delas revelaram-se mineralizadas (tabela 01) e tiveram seus relatórios finais de pesquisa divulgados e aprovados pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

Tabela 1 - Requerimentos de pesquisa.

Processo ANM	Número do Alvará	Publicação no DOU	Área do Pedido (hectares)
804.866/70	635	23/09/70	1.000
804.867/70	636	23/09/70	1.000
804.868/70	637	23/09/70	1.000
804.880/70	586	22/02/73	1.000

As etapas posteriores ocorreram paulatinamente de forma sistemática e conectadas, a fim de uma melhor definição dos prospectos. A primeira etapa contou com a prospecção geoquímica e coleta das amostras para posterior análise química, a qual ocorreu de forma simultânea à abertura das picadas na área. A amostragem foi a trado mecanizado numa malha regional regular de 400 x 200 metros, na qual se retirou apenas material de solo nos 60 centímetros superficiais. Não houve amostragem de lateritos. Dois volumes foram amostrados, com 0,5 decímetros cúbicos cada, um para compor o arsenal da empresa e outro enviado para análise no laboratório de petrografia (LEPET), CPRM- Rio. Ao total foram 145 amostras obtidas e analisadas para Ni, Nb, Ti e P₂O₅. Parte destas também foram analisadas para Fe₂O₃, MgO e SrO₂ e algumas para Co e Cr.

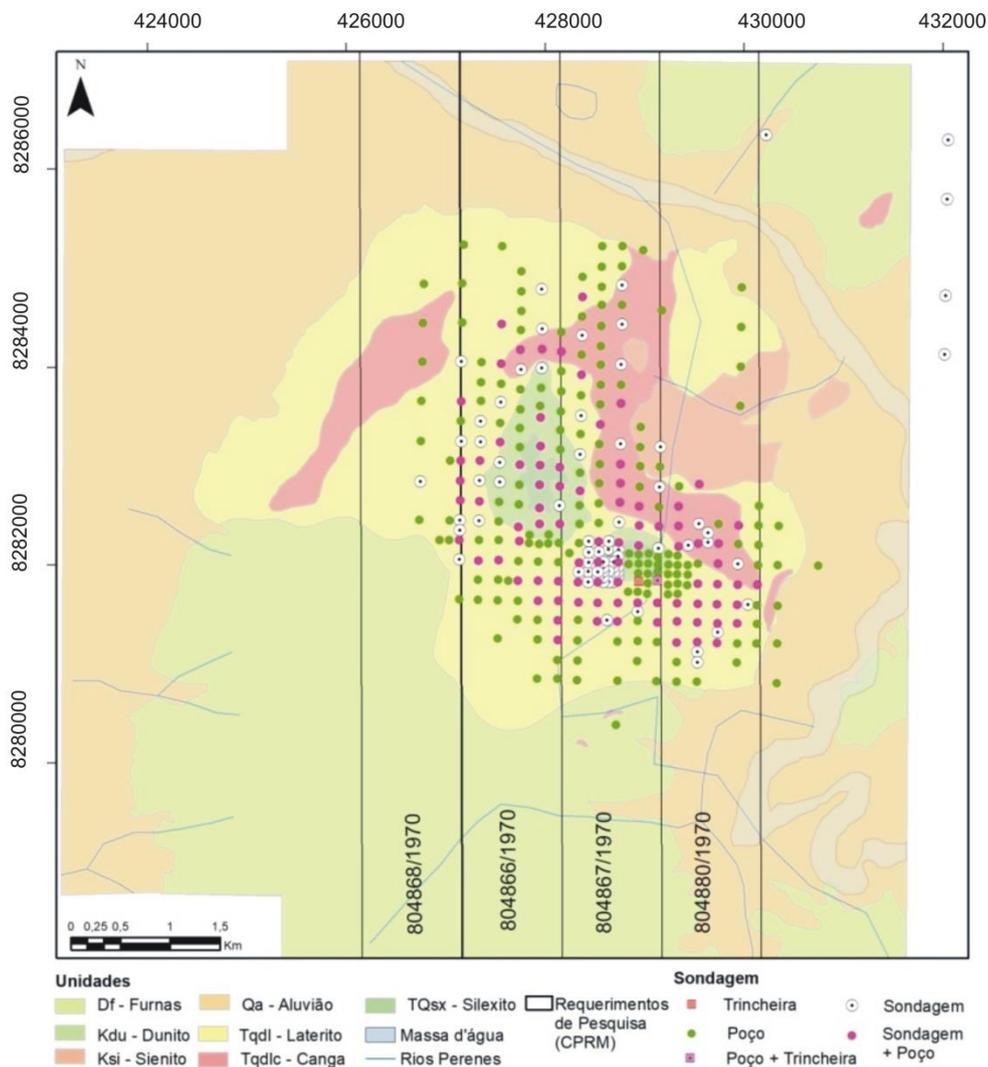
Em seguida, sucedeu-se o levantamento topográfico na escala 1:10.000, com auxílio das picadas para a linha de base E-W e as transversais N-S com adensamento para 100 metros e posteriormente para 50 metros.

Diante dos resultados apresentados foram localizados 256 poços de exploração, totalizando 2.726,05 metros lineares de escavação, em uma malha regular de 400 x 400 metros, posteriormente, adensada para 200 x 200 metros. Atualmente, existem 166 poços registrados no banco de dados do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, resgatado dos dados históricos. Nas áreas em que foram utilizados poços com escoramento devido ao perigo iminente de desmoronamento, tornou-se necessário também a locação de cachimbos para expor a camada mineralizada. Ao total foram executados 5 cachimbos, com remoção de 180 metros cúbicos de material.

Os furos de sondagem diamantada foram executados inicialmente em uma malha regular de 800 x 800 metros. Após o cumprimento deste programa, houve a necessidade de adensar a malha para 400 x 400 metros, e posteriormente, para 200 x 200 metros. Ao todo, foram executados 162 furos, totalizando 5.262,33 metros lineares de sondagem. Estes foram amostrados, por meio de método do canal, de metro em metro.

O mapa apresentado na figura 3 exibe o posicionamento das malhas de poços de exploração, cachimbos (trincheiras) e sondagens rotativas executadas durante o Projeto Morro do Engenho.

Figura 3 - Malha de pesquisa executada no projeto Morro do Engenho pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM em 1972. Fonte: Modificado de Chaban *et al.*, (1975).



A cubagem foi feita a partir da base topográfica 1:10.000, bem como a avaliação das análises químicas obtidas pelos materiais coletados. Foram executados 485 determinações de teor de níquel por espectrometria de raios-x, por meio do método quantitativo e semiquantitativo, efetuados pelo Laboratório de Análises Mineraias da CPRM (LAMIN).

A avaliação de reserva foi realizada pelo método dos blocos geológicos, no qual foram cubadas seguindo a classificação ainda em vigor no ano de 1975 para reservas medidas, indicadas e inferidas para o minério de níquel. Utilizando o *cut-off* de 0,80% de Ni, usado em muitos depósitos do mundo, as reservas calculadas foram de 26.767.753 toneladas para reserva medida, 10.658.134 toneladas para indicada e 1.200.150 toneladas para inferida, totalizando 38.626.037 toneladas com teor médio de 1,103% e volume específico 0,846 metros cúbicos/tonelada. Desta forma, de acordo com os cálculos de viabilidade econômica

de lavra demonstrados no trabalho final de pesquisa do Serviço Geológico do Brasil - CPRM em 1975, o depósito foi avaliado como viável.

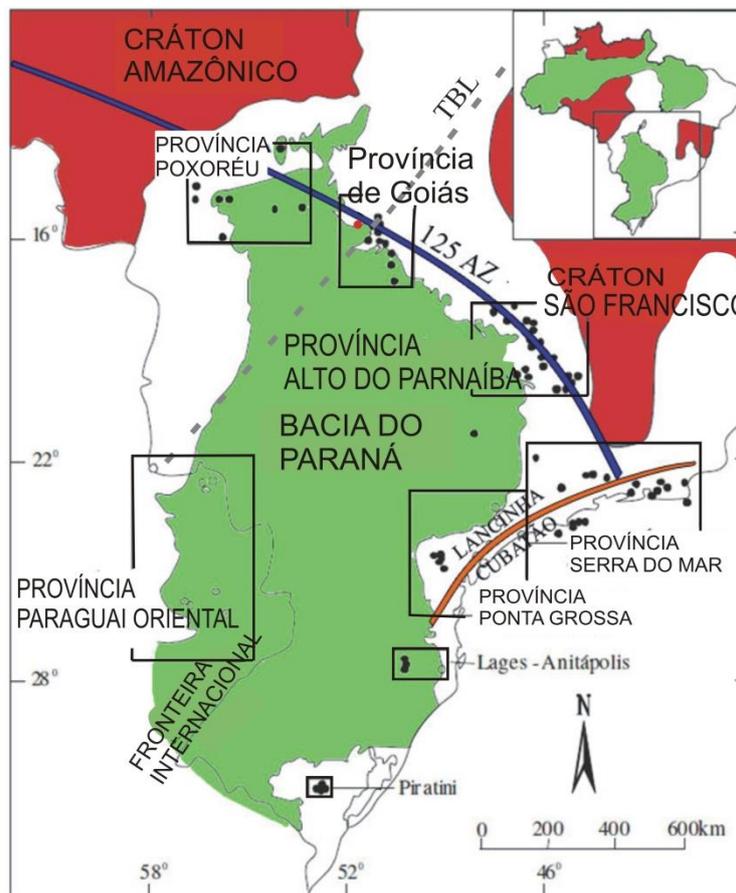
Oliveira (1980) apresentou estudo da alteração intempérica supergênica das rochas ultrabásicas no depósito de Santa Fé, que dista cerca de 120 quilômetros de Morro do Engenho. Os resultados desta pesquisa apontou o comportamento geoquímico dos elementos durante o processo de meteorização e os teores elevados de Ni, Cr e Co associados à garnierita nas baixadas. Além disso, a caracterização mineralógica dos diferentes horizontes salientou as lateritas amarelas como zona mineralizada. A reconstituição dos eventos formadores do depósito também permitiu a evolução da compreensão desta análise, bem como possíveis correlações.

Trabalhos mais recentes, como Dutra e Marangoni (2009) e Dutra *et al.* (2012) investigaram a Província Alcalina de Goiás e a resposta dos corpos máficos-ultramáficos aos métodos geofísicos magnéticos e gravitacionais. O complexo Morro do Engenho exibiu em resultado a inversão da gravidade que as intrusões situadas na crosta superior apresentam cerca de 10 quilômetros, numa direção preferencial NE-SW. As inversões magnéticas permitiram que os autores comparassem à forma esférica exibida e o modelo da gênese dos corpos intrusivo, como o modelo de câmaras magmáticas ao invés de intrusão de tampão.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOTECTÔNICO DA REGIÃO

As províncias alcalinas brasileiras que estão localizadas às margens da Bacia do Paraná, por vezes aflorantes, são o resultado do extenso magmatismo alcalino ocorrido durante o Cretáceo. Conforme descreve Junqueira-Brod (2002), essas rochas são condicionadas a lineamentos com direção NW e NE, cujas direções coincidem com os *trends* estruturais de falhas do embasamento, conhecidos como Lineamento Transbrasiliano, de direção NE e 125° AZ, de direção NW. De acordo com Almeida (1983), estas estruturas são consideradas as principais responsáveis pelo estabelecimento das províncias alcalinas e alcalino-carbonatíticas brasileiras. A área de estudo situa-se praticamente no cruzamento dos lineamentos 125° AZ e Transbrasiliano. A figura 4 também mostra o lineamento Lancinha Cubatão.

Figura 4 - Províncias alcalinas (círculos pretos) que bordejam a Bacia do Paraná condicionados pelos lineamentos 125°AZ marcado na linha contínua em azul, Lancinha-Cubatão traçado na linha contínua em laranja, além do Transbrasiliano (marcado pela linha pontilhada em cinza). Morro do engenho encontra-se em destaque (círculo vermelho). Fonte: Modificado de Biondi (2003).



Neste capítulo serão apresentadas as seguintes unidades litológicas: o embasamento, com representantes do Complexo Granitoide-Gnáissico, as sequências metavulcanossedimentares, Grupo Cuiabá, além magmatismo granítico e máfico-ultramáfico sin a pós-orogênico; a bacia sedimentar do Paraná mais precisamente a Formação Furnas; a província alcalina de Goiás e as diferentes litologias máficas-ultramáficas que constituem o complexo, além do capeamento silicificado, a cobertura laterítica e os sedimentos recentes.

▪ EMBASAMENTO

A unidade do embasamento compreende rochas do Complexo Granitoide-Gnáissico, que se caracterizam como terrenos de assinatura TTG, por vezes milonitizados, provavelmente gerados no Arqueano e retrabalhados no Neoproterozoico. Sobre esta, encontram-se alojadas as sequências metavulcanossedimentares neoproterozoicas de Bom Jardim de Goiás, Arenópolis-Piranhas e Iporá-Amorinópolis (Moreton, 2001).

Depositados sobre o embasamento encontram-se os metassedimentos do Grupo Cuiabá, que de acordo com Moreton (2001), a idade não está bem definida, admitindo-se que o mesmo tenha sido metamorfozido no Neoproterozoico. Além destas unidades, existem as suítes graníticas, que acompanharam a evolução dos arcos magmáticos durante as manifestações do Ciclo Brasileiro (Moura, 2007) no Eo-paleozoico (~570 M.a) e que se fazem presentes por toda região (Moreton, 2001).

a) Complexo Granitoide-Gnáissico

Os terrenos mais primitivos da região são constituídos por gnaiesses diversos (Radaelli, 2000), sendo os mais comuns biotita gnaiesses, que transicionam a migmatitos e granitos de anatexia. De acordo com a coluna estratigráfica da Folha Iporá (Moreton, 2001), estas rochas compõem o Complexo Granitoide-Gnáissico. Este complexo ocupa uma faixa no centro-norte, desde o limite leste da folha, até próximo à cidade de Bom Jardim de Goiás. Devido ao espesso capeamento laterítico, são raros os afloramentos desta unidade, não havendo ocorrência de exposições na área de Morro do Engenho.

O biotita gnaisse apresenta granulação que varia de fina a média, cor cinza e rosa, com alternância de bandas claras, compostas por quartzo e feldspato, e escuras definidas por biotita e acessórios. Assim, a composição modal é determinada por: 30-50% de plagioclásio, 20-40% de quartzo, 15-30% de microclínio, 1-15% de biotita e 5-10% de acessórios (Sobrinho e Andrade, 1971). Esta descrição é ratificada por Moreton (2001) que também discorre sobre outros minerais presentes como: hornblenda, carbonato, esfero, pistacita,

anatásio (?), penina, sericita, granada, allanita e opacos. Os plagioclásios são albita e oligoclásio saussuritizados; a biotita é o principal máfico e exibe alteração para clorita.

As relações de contato com as sequências metavulcanossedimentares são tectônicas, já com os granitoides mais novos, evidencia-se o contato térmico e tectônico (Moreton, 2001).

b) Sequências Metavulcanossedimentares

Estas unidades englobam os conjuntos vulcanossedimentares de Bom Jardim de Goiás, Arenópolis-Piranhas e Iporá-Amorinópolis. Tais unidades não são vistas na região de Morro do Engenho, apenas nas localidades citadas.

Em geral, estas sequências apresentam estratigrafia básica caracterizada em duas zonas, uma inferior e outra superior. A inferior composta por rochas metamáficas, anfíbolitos, anfíbólio xistos (meta-basaltos e meta-andesitos), metavulcânicas de composição intermediárias, metandesitos, metariolitos, metadacitos e algumas unidades constituídas de tufos de composição ácida (dacítica à riolítica). A zona superior é formada por uma associação predominantemente metassedimentar, incluindo mica xistos pelíticos, mármore, anfíbolitos finos, meta-cherts e quartzitos (Moura, 2007).

c) Grupo Cuiabá

Este grupo aflora a sul-sudoeste da cidade de Bom Jardim de Goiás (Moreton, 2001), e não ocorre na região de Morro do Engenho.

São compostos, predominantemente, por filitos cinza avermelhados quando intemperizados, finamente bandados, contendo venulação quartzosa intensa em sequência amplamente deformada. Localmente ocorrem quartzitos, quartzitos feldspáticos, biotita-quartzo xistos, muscovita-biotita xistos e diamictitos (Sá e Marques 1986 *apud* MORETON, 2001). O grau metamórfico é de facies xisto-verde, com foliações penetrativas mergulhando para NE.

d) Magmatismo granítico e máfico-ultramáfico sin a pós-orogênico

Suítas graníticas afloram a 20 quilômetros da cidade de Jussara, descritas por Sobrinho e Andrade, (1971) como corpos graníticos *Rapakivi*. De acordo com Pimentel e Fuck (1987), na região é possível distinguir cinco tipos de corpos granitoides: i) pequenos corpos deformados e metamorfizados gabros a granitos intrusivos nas pilhas supracrustais; ii) granitos-granodioritos miloníticos controlados por falhas; iii) batólitos tarditectônicos de

rochas plutônicas porfiríticas, que variam de gabro e quartzo diorito a monzogranito; iv) batólitos e *stocks* pós-tectônicos de granitos róseos a vermelhos; v) *stocks* pós-tectônicos de granitos a hornblenda.

Ainda de acordo com os mesmos autores, as idades variam entre 692 ± 110 Ma, obtida no granito milonítico da Serra do Tatu e 462 ± 28 Ma, datada em hornblenda granitos pós-tectônicos de Israelândia.

▪ BACIA DO PARANÁ

O corpo de Morro do Engenho está inserido na borda da Bacia do Paraná praticamente no cruzamento dos megalineamentos 125° AZ e Transbrasiliano, os quais controlam as posições de um grande número de complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos.

A Bacia do Paraná tem uma área de 1.500.000 quilômetros quadrados, ocupando parte dos territórios do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai. É classificada como bacia do tipo intracratônica, desenvolvida inteiramente sobre a crosta continental, sendo preenchida por uma sucessão de rochas sedimentares e vulcânicas com idades que variam do Neo-Ordoviciano ao Neocretáceo (Milani, 2004, p. 266).

O então regime transtensivo, de falhas profundas, permitiu a geração de magmas locais, assim como a instalação do Basalto Três Lagos datado através do método Ar/Ar em 443 ± 10 Ma (York, 2003 *apud* Milani, 2004, p. 272).

O registro policíclico da Bacia do Paraná está representado por seis unidades de segunda ordem que constituem seu arcabouço estratigráfico: Supersequência Rio Ivaí (Neo-Ordoviciano – Eosiluriano); Supersequência Paraná (Eodevoniano – Neodevoniano); Supersequência Gondwana I (Neocarbonífero – Eotriássico); Supersequência Gondwana II (Mesotriássico – Neotriássico); Supersequência Gondwana III (Neojurássico – Eocretáceo); Supersequência Bauru (Eocretáceo – Neocretáceo) (Milani, 2004, p. 268).

O corpo do Morro do Engenho está encaixado nos sedimentos da Formação Furnas da Supersequência Paraná a qual será abordada na descrição geológica local. As poucas informações paleontológicas dificultam a datação precisa da mesma. Contudo, considerando a passagem gradacional no interior da Bacia do Paraná, desde a base da Formação Ponta Grossa, e o registro, na parte superior, da unidade de restos vegetais (*Psilophylates*) que se

distribuído do Siluriano Superior ao Devoniano Médio, a Formação Furnas é considerada do Eodevoniano (Rodrigues *et al.*, 1989, Assine *et al.*, 1994, Milani e Melo, 2007).

a) Formação Furnas

Sobrinho e Andrade (1971) e Moura (2007) caracterizam os arenitos da Formação Furnas ocorrentes na região de Iporá, Montes Claros e Jussara. Segundo os autores, esta formação compreende a unidade basal da Sequência Devoniana da Bacia do Paraná e sua estratigrafia inicia-se por conglomerado basal polimítico, sem grande extensão lateral, podendo atingir até 15 metros de espessura. A rocha apresenta seixos de quartzo e casualmente de quartzito, além de rochas ígneas e metamórficas, passando para arenito de granulometria grossa a média, subarredondados, com níveis conglomeráticos, no qual os seixos podem variar de 10 a 50 milímetros (Moura, 2007, Sobrinho e Andrade, 1971).

Próximo à base, o acamamento gradacional e as estratificações cruzadas acanaladas e planares subordinadas identificam o ambiente continental fluvial. Ao topo, a sequência marinha é registrada por arenitos médios a grossos, de boa esfericidade e subarredondados, róseos, de composição modal estimada em 95% de quartzo e 5% de cimento argilo-ferruginoso, com estratificações cruzadas planares que apontam um ambiente transicional costeiro (Moura, 2007; Sobrinho e Andrade, 1971; Assine, 1994). Também aparecem camadas de arenitos muito finos com estratificação do tipo *hummocky* (Milani e Melo, 2007).

A Formação Furnas, no oeste de Goiás, ocorre tanto em contato discordante sobre o embasamento, constituído por gnaisses, sequências vulcanossedimentares e granitos tardi a pós-tectônicos do Ciclo Brasileiro, como também em contato discordante erosivo sobre a Formação Vila Maria, a qual marca um hiato de sedimentação na Bacia do Paraná, que persistiu por todo o Neossiluriano (Assine *et al.*, 1994).

Intrusivas alcalinas ocorrem cortando esses sedimentos, sendo representadas na região de estudo pela a Província Alcalina de Goiás, cuja tendência ascensional manifesta-se desde o cretáceo inferior (Reativação Wealdeniana de Almeida, 1983), se estendendo até o Paleógeno (Almeida 1967,1983).

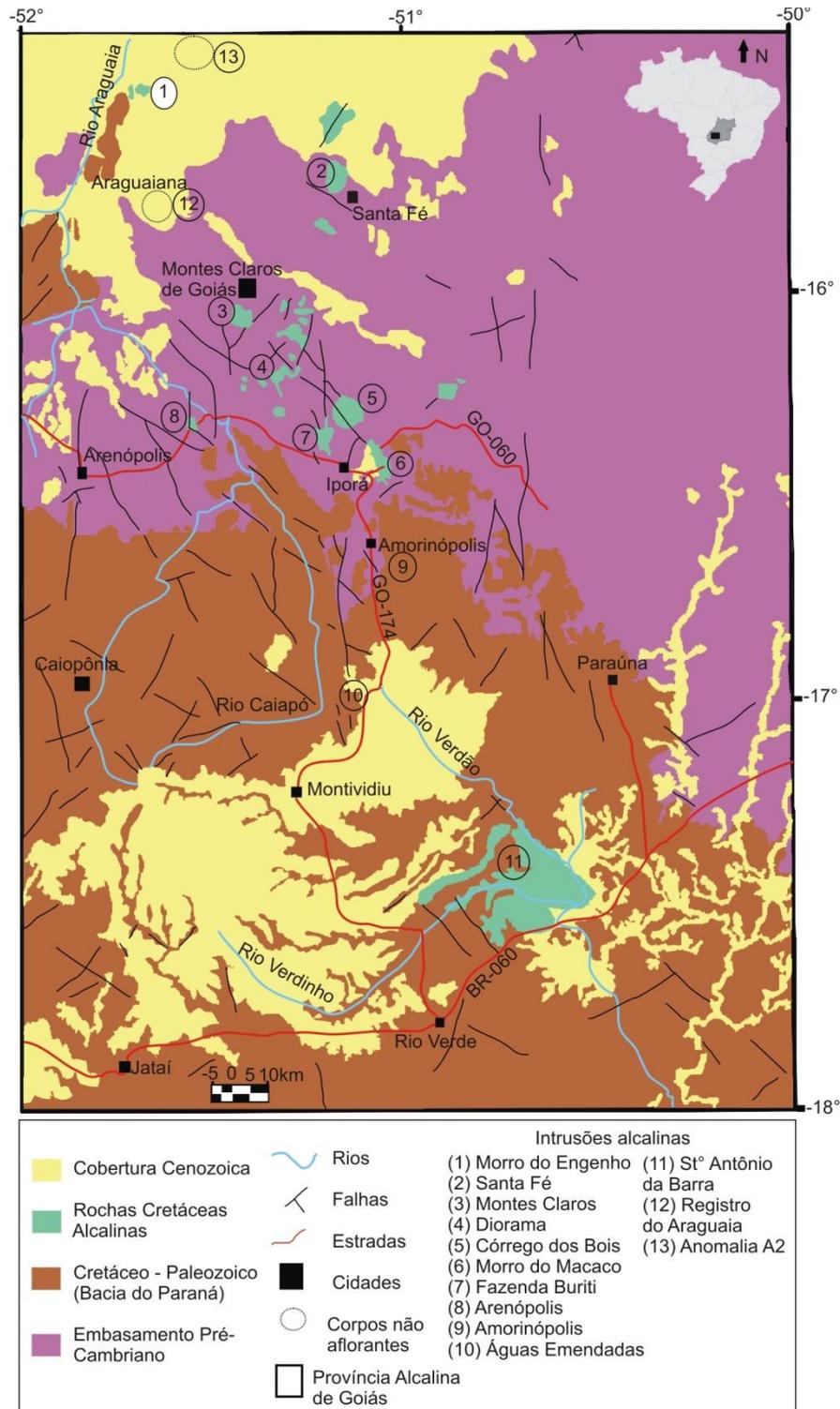
Quando em contato com as rochas intrusivas, os arenitos apresentam a seguinte composição modal: 50-70% de quartzo, 30-40% de plagioclásio e 5-10% de opacos. Além disso, ocorre zircão, biotita, pistacita, turmalina, cordierita, sillimanita, andaluzita e

microclínio, o que permite a classificação de albita-epidoto-hornfels até feldspato-cordierita-hornfels (Sobrinho e Andrade, 1971).

- PROVÍNCIA ALCALINA DE GOIÁS

A Província Alcalina de Goiás (PAGO), conforme proposta de Junqueira-Brod (2002), engloba desde a região de Araguaiana – Santa Fé a norte, até a região de Santo Antônio da Barra – Rio Verde a sul (figura 5) distribuída ao longo de um *trend* estrutural de direção N30°W, com aproximadamente 250 quilômetros de comprimento por 70 quilômetros de largura. A porção norte da província, inicialmente denominada como Grupo Iporá por Guimarães *et al.* (1968) *apud* Junqueira-Brod (2002), inclui complexos alcalinos máfico-ultramáfico e intrusões alcalinas subvulcânicas na região central além de produtos vulcânicos ao sul, com a ocorrência de vários diques.

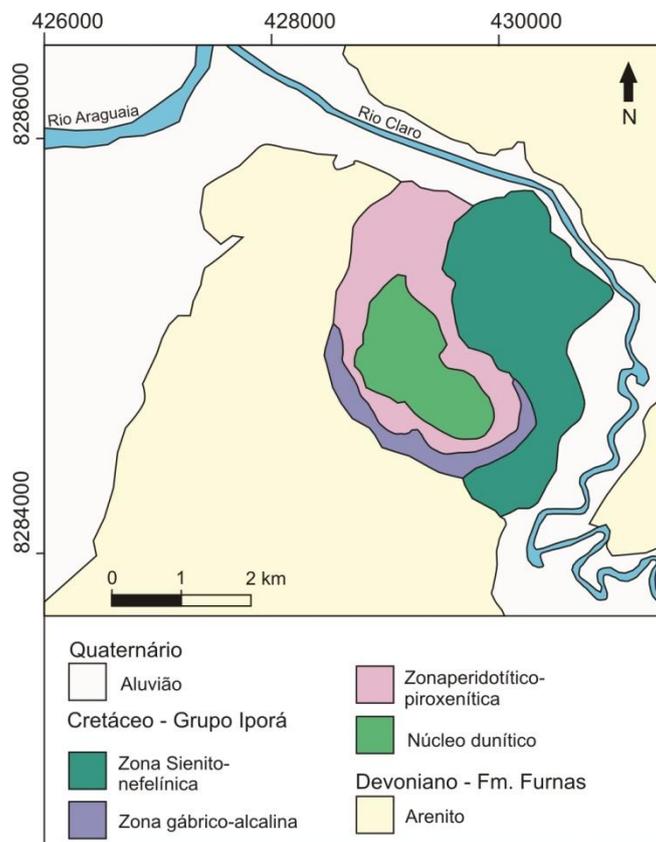
Figura 5 - Mapa Geológico da PAGO com as intrusões alcalinas devidamente enumeradas. Fonte: Modificado Brod *et al.*, (2005) *apud* Dutra *et al.*, (2012).



Na porção norte da PAGO, próximo à Araguaiana, aflora o Complexo Morro do Engenho, caracterizado por uma intrusão de núcleo dunítico, circundado por peridotito, piroxenito, além de gabro alcalino e nefelina sienito, sustentados por coberturas de material

silicificado (Chaban *et al.*, 1975) (figura 6). O Complexo possui aproximadamente 5 quilômetros de diâmetro (Junqueira-Brod, 2002).

Figura 6 - Mapa Geológico da região de Morro do Engenho. Fonte: Modificado de Biondi (2003, p. 407).



A rocha predominante é o dunito parcialmente serpentinizado e silicificado. Sobrinho e Andrade (1971) descrevem a composição modal estimada da seguinte forma: 40-80% olivina, 10-30% cristobalita, 0-5% de augita e 5-10% de opacos. A zona peridotito-piroxenítica envolve o núcleo dunitico numa largura que varia de 200 a 400 metros. Dificilmente afloramentos representantes destas rochas são encontrados, apenas uma extensa camada de solo laterítico uniforme (Chaban *et al.* 1975). Já a composição modal da zona gabroica, segundo Sobrinho e Andrade (1971), é formada por 40-50% de augita, 30-40% de plagioclásio, 10-15% de biotita, 0-10% de nefelina e menos de 5% de opacos.

A zona sienito-nefelínica apresenta afloramentos a NE da área, formando diversos blocos de rocha fraturada e em raros pontos, a alteração produz esfoliações esferoidais. Segundo Chaban *et al.*(1975), as rochas desta unidade apresentam coloração cinza claro à rosado e granulação média. Sobrinho e Andrade (1971) descrevem a composição estimada em 30-40% de aegirina-augita, 30-40% de microclínio, 30-35% de andesina e 5% de opacos.

Todo o complexo intrusivo é continuamente cortado por diques de rochas básicas a alcalinas, com poucos centímetros de espessura. A coloração da rocha é cinza escuro, granulação fina e isotrópica. Sobrinho e Andrade (1971) descreveram a seguinte composição modal: 40-60% de augita, 20-40% de oligoclásio, 5-10% de biotita e 5-10% de opacos. Ocorrem, de maneira menos expressiva, a pistacita, clorita e apatita.

Dados geocronológicos de K/Ar do complexo máfico-ultramáfico alcalino de Santa Fé, localizado a leste de Morro do Engenho, apresentados por Barbour (1979), apontam uma evolução que se processou num intervalo compreendido entre 82,6 a 88,4 Ma. Em apenas uma obtenção, foi revelada uma idade mais jovem de $74,4 \pm 3,4$ Ma.

Alguns autores correlacionaram a atividade mantélica da PAGO com plumas já reconhecidas. De acordo com Gibson *et al.* (1995) a região de Iporá foi afetada pela Pluma de Trindade no Cretáceo Superior. Bizzi e Vidotti (2003, p.341) relacionam a formação do complexo alcalino da PAGO à atividade da pluma de Tristão da Cunha e Trindade. Contudo, Marques e Ernesto (2004, p. 260), através da reconstrução paleogeográfica, concluíram que a pluma de Tristão da Cunha não contribui nem mesmo com o calor para a evolução da PAGO.

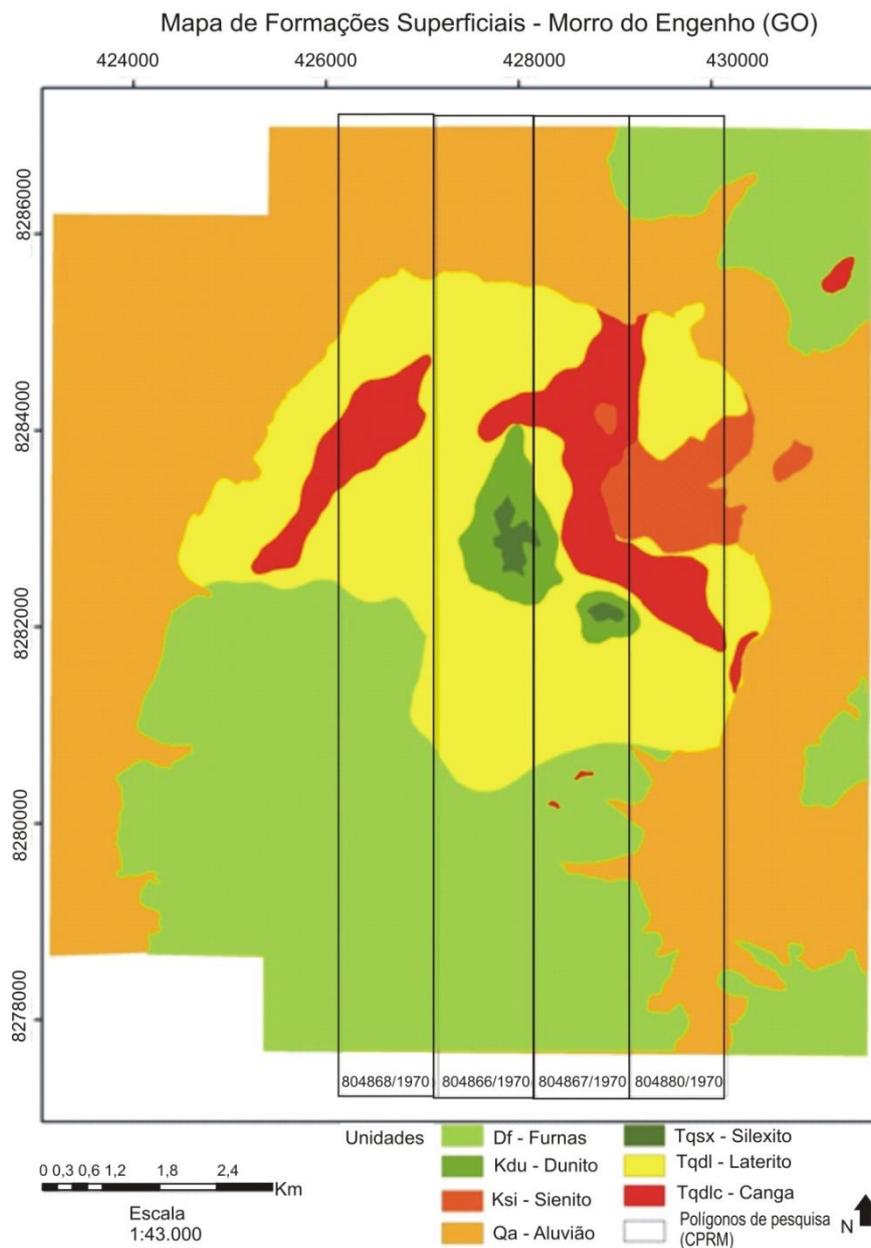
▪ CAPEAMENTO SILICIFICADO

Esta cobertura abrange a parte superior do Morro do Engenho, possuindo uma espessura cerca de 25 metros em média. Trata-se de blocos de calcedônia imersos numa matriz terrosa, pulverulenta, de coloração amarelo-ocre a vermelho-escuro, muito rica em ferro. Já os blocos possuem coloração marrom escuro, de contornos angulares (Chaban *et al.*, 1975).

▪ COBERTURA LATERÍTICA

Esta cobertura recobre toda a área sendo resultado dos processos intempéricos erosivos relacionados aos diversos ciclos geomorfológicos no qual as rochas anteriormente descritas foram submetidas (Figura 7).

Figura 7 - Mapa de Formações Superficiais de Morro do Engenho (GO) com as áreas de pesquisa do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em destaque. Fonte: Modificado de Chaban *et al.*, (1975).



Diante da expressiva abrangência na região e significativa espessura (1 a 3 metros), Biondi (2003, p.383) descreve a importância do mapeamento dessas coberturas e o seu potencial para conter jazidas minerais. Tais características são comprovadas nos furos de sondagem do projeto Morro do Engenho, os quais geralmente apresentam o registro desta unidade nos primeiros metros de recuperação dos testemunhos.

▪ ALUVIÕES

Devido a sua grande extensão geográfica, é importante mencionar a unidade aluvionar pleistocênica do Rio Araguaia, constituída de areia média a grossa composta essencialmente por quartzo.

3.1 SÍNTESE DO ARCABOUÇO ESTRUTURAL

A caracterização da deformação impressa nas unidades geológicas anteriormente descritas apresenta importância singular no entendimento do posicionamento e evolução da PAGO, tendo em vista sua proximidade com o lineamento 125° AZ.

Moura (2007) elabora uma síntese estrutural da região. De acordo com a autora, a fase mais antiga de deformação, denominada D₁ é representada por uma foliação fortemente transposta pelas estruturas geradas na fase subsequente D₂, o que torna dificultosa a sua descrição. A fase D₂ caracteriza a principal fase de deformação, e é representada por zonas de cisalhamento direcionais sinistrais de atitude N35°-45°W/subvertical e foliações miloníticas com atitude predominante N15°-25°W/subvertical. Além destas, direções de juntas foram descritas, tais como NNW, NNE, NE, WNW e ENE.

Após a fase D₂, as estruturas planares e lineares geradas anteriormente foram deformadas de forma mais moderada, resultando em dobramentos suaves, *kinks* e *chevrons*, sendo, por muitas vezes, representadas como pares de dobramentos cruzados conjugados, os quais, estão relacionados à terceira fase de deformação denominada D₃. A fase de deformação D₄ simboliza a descompressão geral da área e como resultado, produziram fraturamentos e falhamentos extensionais generalizados que se instalaram em sua maioria, aproveitando zonas de fraquezas pretéritas.

Assim, todas as fases citadas D₁, D₂, D₃ e D₄ podem estar correlacionadas a um único evento de deformação progressiva, ocorrida durante a orogênese brasileira (Moura, 2007).

Após o Proterozoico, a região do depósito de Morro do Engenho passou por diversos eventos de reativação, relacionados à instalação da Bacia do Paraná, principalmente durante a sedimentação das unidades paleozoicas, sendo a discordância Permo-Carbonífera um dos hiatos mais representativos existentes na bacia (Assine *et al.*, 1994; Milani e Ramos, 1998). Almeida (1967) relaciona o Mesozoico à Reativação Sul-Atlântica da Plataforma Sul Americana. No Cretáceo Superior-Terciário a região foi afetada por uma tectônica rúptil correlacionável a abertura do oceano Atlântico, seguido pelo magmatismo alcalino, como determina as idades obtidas em rochas da Província Alcalina de Goiás (Barbour *et al.* 1979), concomitante ou posterior ao magmatismo básico da Formação Serra Geral. As reativações mesozoicas e tardi-mesozoicas refletem fraturas e falhas normais observadas nas unidades paleozoicas (Moura, 2007).

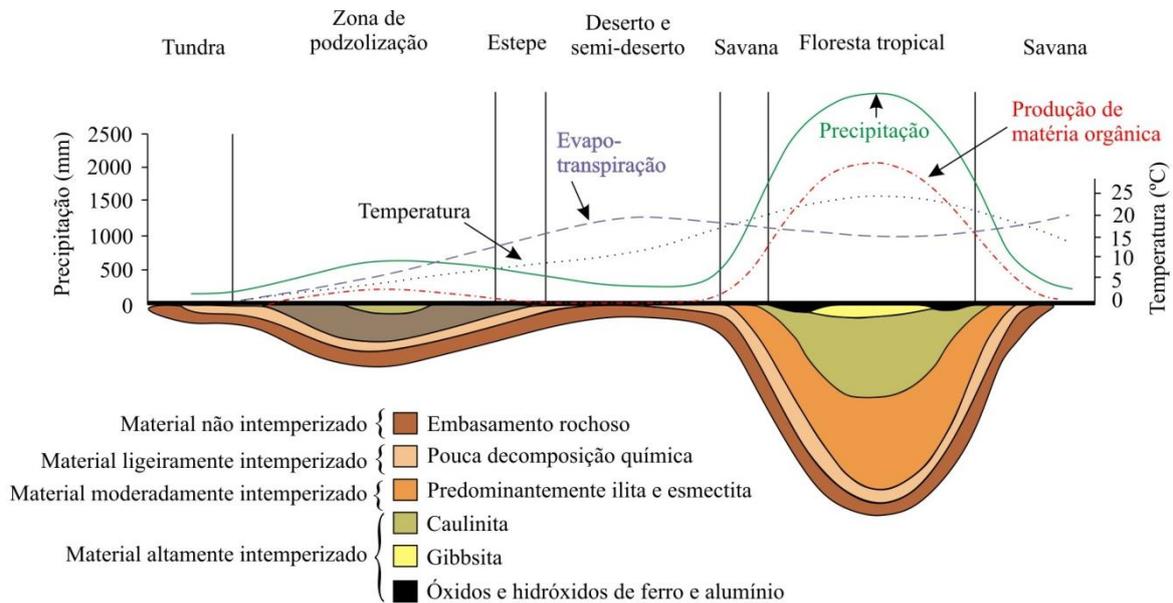
4. GÊNESE DOS DEPÓSITOS LATERÍTICOS: ESTADO DA ARTE

A zona de intemperismo corresponde ao contato transicional ou interação entre a litosfera e a atmosfera, nos quais as propriedades físicas, mineralógicas e químicas das rochas em superfície ou próximas a esta, estão modificados progressivamente. Assim, sob as novas condições termodinâmicas, sob temperaturas menores de 30°C e pressão menor que 1 bar, além da presença de H₂O e O₂, os minerais formadores de rocha, denominados primários entram em estado de desequilíbrio termodinâmico, e na busca do equilíbrio se transformam em novos minerais, denominados secundários ou neoformados. (Toledo *et al.*, 2000, p. 150).

O processo de intemperismo é controlado pelos diversos agentes, são estes: material parental ou rocha mãe, onde as características como porosidade, susceptibilidade mineral e composição definirão a química final; clima, no qual precipitação pluviométrica e variação de temperaturas são elementos chave; topografia e declividade do terreno, que controlam a taxa de infiltração e percolação da água nas rochas; atividade biótica da vegetação e micro-organismos; além do tempo de exposição a esses agentes (Toledo *et al.*, 2000, p. 150-157).

O clima exerce tamanha influência que dita à geração dos distintos tipos de solo em virtude principalmente da temperatura e porcentagem de precipitação, fatores determinantes para as principais reações químicas. Na figura 8, observa-se, que em ambientes árticos, a hidratação é remota devido à mínima quantidade de água da chuva. Assim, o intemperismo e a decomposição da matéria orgânica são lentos, inibindo a lixiviação dos constituintes móveis. A alta precipitação promove alta lixiviação, contudo a baixa temperatura resulta em decomposição lenta da matéria orgânica. Neste caso, tende a formação dos *podzóis*. Em ambientes de baixa umidade e com alta temperatura, ocorre a bissialitização, no qual os filossilicatos predominantes são do tipo 2:1. São frequentes em regiões desérticas ou semiáridas, sendo comum a geração dos vertissolos. Já quando a alta umidade e temperatura atuam concomitantemente, resulta-se na alitização com lixiviação intensa que ocorrem em um longo espaço de tempo, gerando solos profundos.

Figura 8 - Distribuição e profundidade do solo e associação ao clima. Fonte: Modificado de Toledo *et al.* (2000, p. 154).



Além disso, o clima influencia na dinâmica do lençol freático, promovendo assim, mudanças geoquímicas e essas alterações são agentes de construção dos perfis pedomorfológicos. Essa movimentação vertical impulsada pela água subterrânea retira alguns elementos móveis como o potássio e acumula outros, a exemplo o ferro, tanto em ambiente redutor como oxidante. Em clima muito úmido, conseqüentemente com elevados níveis do lençol freático, os elementos químicos da base do perfil elevam-se e entram na solução, formando hidróxidos de ferro, como por exemplo, a goethita. Nos climas secos há a tendência de formação das hematitas.

Desta forma, o resíduo final de uma rocha intensamente intemperizada compõe uma composição específica, dentre as quais podem ser citadas: os óxidos e hidróxidos de ferro (hematita Fe_2O_3 , goethita FeOOH e limonita $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2$); alumínio (gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$); titânio (anatásio TiO_2); mangânes residual e níquel. Cabe ressaltar também os argilominerais formados como a caulinita (1:1) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e a esmectita (2:1), e os resistatos, a exemplo, do quartzo, zircão, cromita, ilmenita, dentre outros.

A pedogênese é o conjunto de processos que resultam na formação do solo, que inclui a reorganização do material intemperizado, juntamente com atividade biológica. A atuação do intemperismo e pedogênese imprime distintas características morfológicas ao solo, incluindo a formação de horizontes, permitindo a geração do sistema laterítico e/ou residual.

De acordo com Schellman (1983) *apud* Aleva (1993, p.13), lateritos são produtos de intenso intemperismo das rochas e consistem predominantemente da assembleia de minerais que incluem a goethita, hematita, hidróxidos de alumínio, caulinita e quartzo. Os lateritos são produtos do intemperismo tropical e definem-se como um quarto tipo de rocha, as residuais. Para Costa (2008) os lateritos são materiais geológicos resultantes dos processos de lateritização, formados pelo intemperismo em paleoclima tropical a partir de qualquer tipo de rocha exposta à superfície. Conforme Biondi (2003, p. 383), o desenvolvimento de um perfil laterítico, além dos fatores do intemperismo, também é influenciado pela estabilidade tectônica, pois as movimentações tectônicas causam mudanças no relevo, o que pode, conseqüentemente, variar os regimes hidrogeológicos superficial e/ou subsuperficial, prejudicando o processo de lateritização e destruindo as lateritas anteriormente formadas. Ainda de acordo com o mesmo autor, todas as condições anteriormente citadas são comuns ao menos desde o Mesoproterozoico, porque a existência de depósitos antigos depende mais da preservação do material formado.

Os perfis lateríticos são caracterizados por um zoneamento definido em horizontes, refletindo o diferenciado grau de mobilidade química dos elementos em condições atmosféricas (tabela 02). A base do perfil é caracterizada pela zona do saprólito com a rocha em baixo grau de intemperização, onde há a preservação da textura e fábrica pretérita. O saprólito inferior marca a destruição dos feldspatos e minerais ferromagnesianos, com a sílica e o alumínio resistindo na estrutura dos minerais. Na zona do saprólito superior apenas a muscovita e o talco conseguem resistir. Acima desta, existe o pedolito, caracterizado pela total destruição das feições da rocha-mãe. Há dominância de sílica, alumínio e ferro férrico além da caulinita, quartzo, hematita e goethita. Algumas apresentam texturas de pisolitos e nódulos, e metais como Au, Cr, V, Sc, Ga podem estar associados (Costa, 2007, p. 30).

Tabela 2 - Mobilidade geoquímica dos elementos durante o intemperismo laterítico. Fonte: Costa (2007, p. 30)

Minerais Hospedeiros		Lixiviado	Retido parcialmente em minerais secundários
Liberado	na zona		
mosqueada	e zona		
ferruginosa:		K, Rb, Cs, elementos traços;	Si, Al (caulinita)
Aluminossilicatos (muscovita, Au caulinita);			

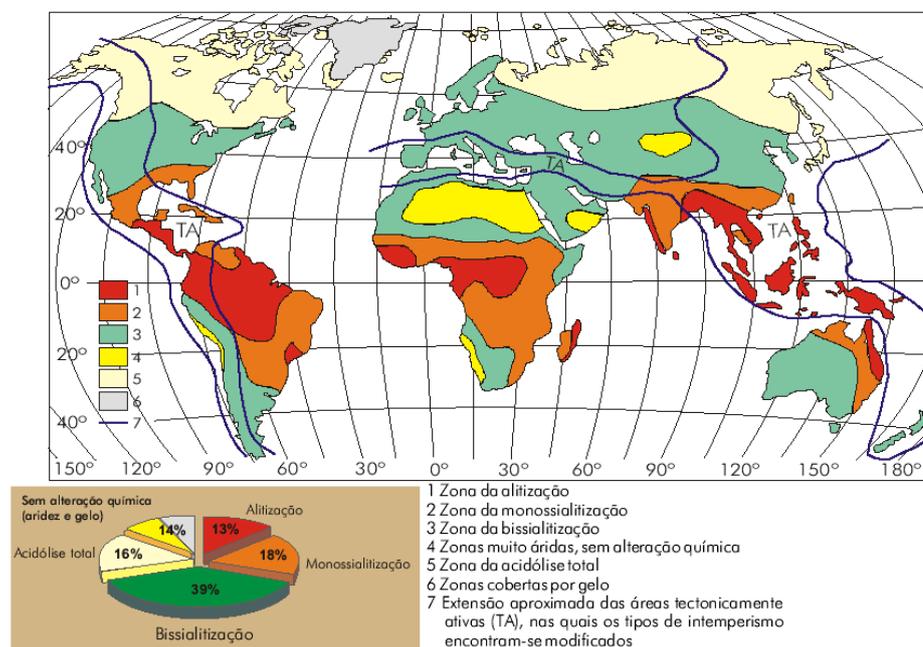
Óxidos de ferro; ouro.		
Liberado na zona superior do saprólito:	Cs, K, Rb, Mg, Li Ca, Mg, Na	Si, Al (caulinita) Fe, Ni, Co, Cr, Ga, Mn, Ti, V, óxidos de Fe e Mn
Aluminosilicatos (muscovita); Ferromagnesianos (clorita, talco, anfibólio). Argilas de esmectita.		
Liberado na zona inferior do saprólito:		
Aluminosilicatos; Ferromagnesianos (piroxênio, olivina, anfibólio, clorita e biotita).	Ca, Cs, K, Na, Rb Ca, Mg	Si, Al (caulinita); Ba (barita) Fe, Ni, Co, Cr, Ga, Mn, Ti, V, óxidos de Fe e Mn
Lançado na frente do intemperismo:		
Sulfetos:	As, Au, Cd, Co, Cu, Mo Ni, Zn, S Ca, Mg, Fe, Mn, Sr	As, Cu, Ni, Pb, Sb, Zn (óxi- hidróxidos de ferro)
Carbonatos:		

O processo de concentração supergênica caracteriza-se pelos elementos ou substâncias químicas mobilizadas das zonas ricas em oxigênio geradas pelo intemperismo superficial e precipitados próximos ou junto à rocha intemperizada. O minério então é constituído por substâncias que foram mobilizadas. Portanto, no processo de concentração residual, as substâncias não lixiviadas tem seus teores elevados, formando os resíduos da lixiviação, caracterizando o depósito. Assim, os tipos de depósitos referem-se aos elementos que foram concentrados: garnieríticos ou oxi-silicatados de níquel e cobalto, bauxíticos, com Al (Ga), de ferro, mangânes, ouro, titânio, fosfatos, magnetita e elementos Terras Raras, fosfatos em carbonatitos, argilominerais, cobre, níquel e urânio (Toledo *et al.*, 2000, p. 163-165).

Em todos os continentes, principalmente, nos terrenos da África, Ásia (Índia e Filipinas), Austrália, Nova Caledônia e América do Sul (Brasil, Venezuela, Colômbia, Guiana

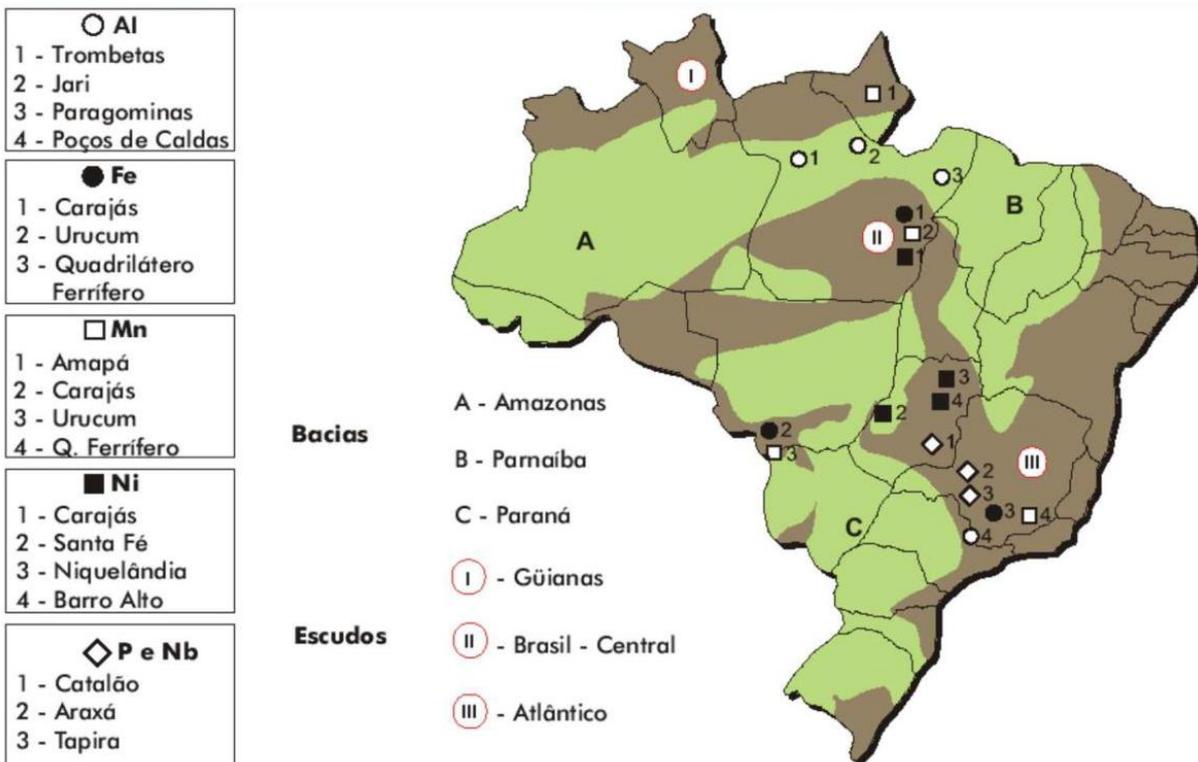
Francesa e Suriname) e países do Caribe, ocorrem importantes depósitos minerais lateríticos de ferro, alumínio, manganês, níquel, ouro, entre outros. As formações lateríticas cenozoicas são frequentemente encontradas no grande cinturão intertropical atual (figura 9), situado entre 30° sul e 30° norte do Equador, onde dos 40% correspondentes às terras emersas, 33% são cobertas por formações lateríticas, representadas, em sua maioria, por zonas de formação de gibbsita e caulinita (monossilização) (Toledo *et al.*, 2000, p. 149).

Figura 9 - Distribuição dos principais processos de intemperismo na superfície da Terra. Fonte: Toledo *et al.*, (2000, p. 149).



O Brasil, devido às suas condições climáticas tropicais, por vezes semiáridas, a partir do final do Cretáceo e relativa estabilidade tectônica, com a complexidade dos terrenos geológicos do Arqueano e Mesozoico, permitiu a formação de diversos depósitos lateríticos, que ainda são pouco estudados e podem tornar-se importantes fronteiras de pesquisas (Costa, 2008). Na figura 10, é possível observar a distribuição dos mais importantes depósitos lateríticos brasileiros.

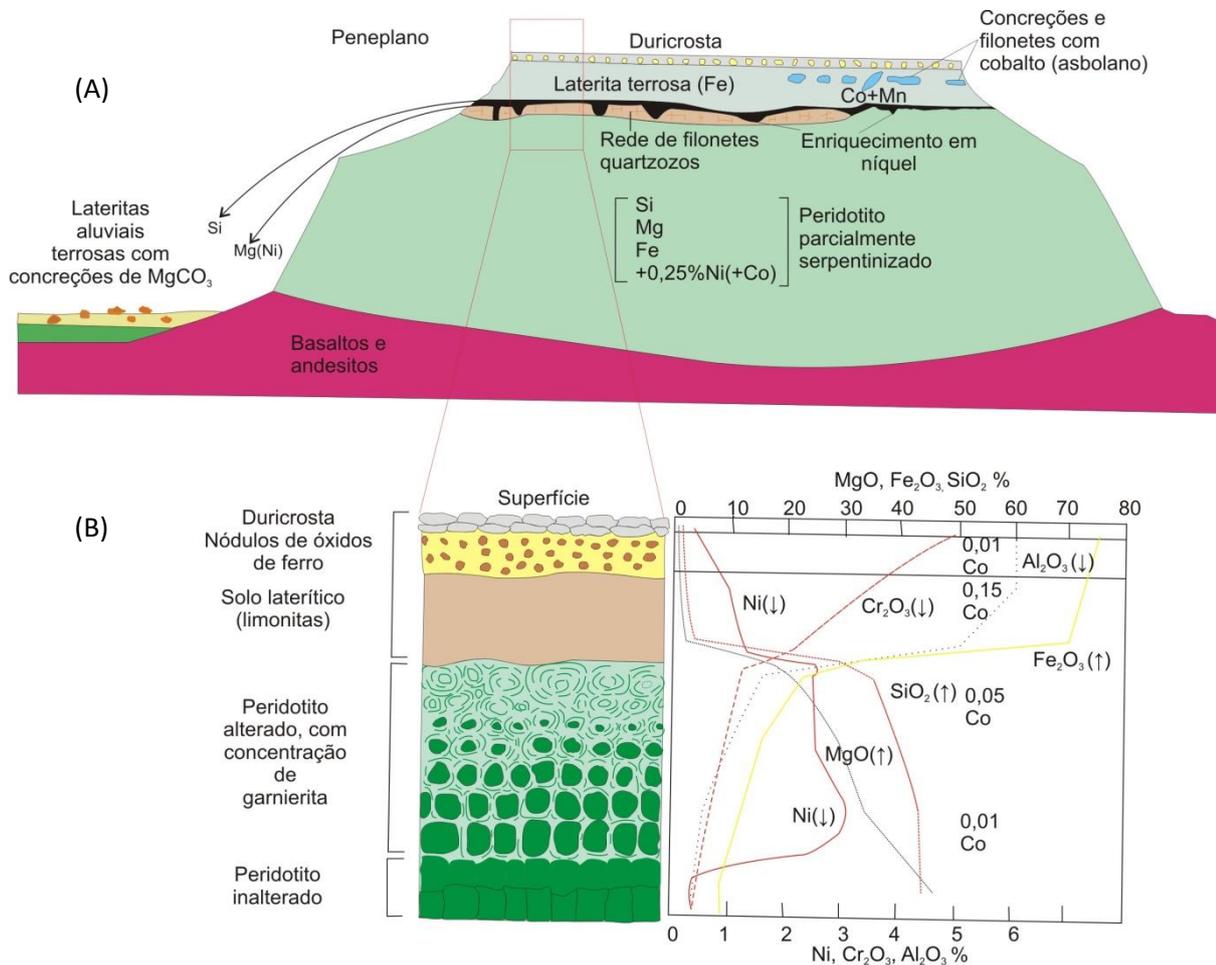
Figura 10 - Localização dos mais importantes depósitos lateríticos do Brasil de Al, Mn, Fe, Ni, P e Nb. Fonte: Toledo *et.al.*, (2000, p.164).



▪ DEPÓSITOS RESIDUAIS E SUPERGÊNICOS GARNIERÍTICOS OU OXI-SILICATADOS DE NÍQUEL E COBALTO

Os lateritos níquel-cobaltíferos são depósitos superficiais com corpos mineralizados estratóides, nas quais a superfície plana é o limite superior, e o limite inferior é muito irregular e descontínuo (figura 11).

Figura 11 - Esquema da estrutura interna de depósitos de Ni e Co garnieríticos (oxi-silicatados). (A) Depósitos garnieríticos e seu desenvolvimento sobre rochas ultrabásicas, e a transformação dos silicatos primários em silicatos e óxidos secundários, intempéricos, enriquecidos em Ni e Co. (B) O Ni e Co concentram-se principalmente na região da rocha intemperizada. Fonte: Biondi (2003, p. 385).



De acordo com Biondi (2003, p.381), a duricrosta ou zona oxidada consiste no topo do perfil, figura 11-B e é predominantemente constituída por goethita. Abaixo desta, há um horizonte caracterizado por óxidos de Fe, principalmente goethita e óxidos de Mn e Co. O níquel encontra-se relacionado à garnierita. Choque Fernandez (2018), apresenta o termo garnierita como genérico para o minério de níquel esverdeado de grão fino, pobre em cristalinidade e que hospeda predominantemente uma variedade de fases. Seguindo o trabalho deste autor e seu levantamento bibliográfico, essa mistura de minerais pode tratar-se de series do grupo da serpentina, como lizardita-népouita, crisotila-pecoraita, berthierina-brindleyita; estruturas tipo talco, como talco-willemseita e kerolita-pimelita; além da series clorita clinocloro-nimita e sepiolita-falcondoita. A mais comum das garnieritas encontradas são lizardita-népouita e “kerolita-pimelita”, e muitos autores simplificam a classificação para “tipo serpentina” e “tipo talco”.

Historicamente a maior parte da produção de níquel no mundo é derivada do minério sulfetado, enquanto a maioria dos recursos existentes é proveniente de depósitos lateríticos. Dessa forma, para suprir a demanda global, a expectativa é de que, nos próximos anos, haja um aumento no desenvolvimento de projetos de níquel a partir de fontes lateríticas (MUDD, 2009). Atualmente, destacam-se Goro e Koniambo em Nova Caledônia, Ravensthorpe (WA) e Sorowako na Indonésia.

De acordo com Mudd e Jowitt (2014) a extensão dos recursos globais de Ni estudadas no período de publicação do trabalho avaliou 296,2 milhões de toneladas de Ni globalmente distribuídas, divididas em 253 depósitos de sulfeto contendo 118,0 milhões de toneladas de Ni (40,5%) e 224 do tipo laterítico contendo 178,1 milhões de toneladas de Ni (59,5%), sendo mais de 3,38 milhões de toneladas de Ni na China. Dados avaliados em 2018 pela USGS ratificam que das 130 milhões de toneladas disponíveis como recursos terrestres, cerca de 60% correspondem a depósitos lateríticos e 40% aos sulfetados.

No Brasil, com exceção do depósito de Fortaleza de Minas e da Fazenda Santa Rita na Bahia, praticamente todo o níquel produzido advém de depósitos lateríticos. As maiores minas são as de Niquelândia (GO), Vermelho (Serra dos Carajás, PA) e Morro do Níquel (MG), mas muitas outras minas e depósitos valem ser ressaltados, como Barro Alto (GO), Morro do Engenho (GO), São João do Piauí (PI), Onça-Puma, Jacaré e Jacarezinho, município de São Félix do Xingu (PA) e Jacupiranga (SP), dentre outros (Biondi, 2003, p. 403).

4.1 MINERALIZAÇÃO DO DEPÓSITO DE MORRO DO ENGENHO

▪ GÊNESE DO DEPÓSITO DE MORRO DO ENGENHO

Neste capítulo houve a integração dos dados bibliográficos referentes à composição mineralógica e química das rochas ultramáficas de Morro do Engenho, bem como seus produtos de alteração, a fim de descrever o processo de lateritização e a gênese da mineralização de níquel na região estudada. A divisão temporal apresentada seguirá o modelo de Oliveira (1980).

Como visto no capítulo anterior, os principais controles do enriquecimento supergênico de níquel são características singulares em função das condicionantes envolvidas em cada depósito em particular. Desta forma, neste capítulo serão discutidos os principais aspectos do processo de lateritização gerador da mineralização de níquel no Complexo Morro do Engenho.

O complexo de Morro do Engenho composto predominantemente por dunitos, rodeado de peridotitos e piroxenitos (Radaelli, 2000), passam primeiramente pelo “enriquecimento primário” através da serpentinização, uma hidratação dessas rochas ricas em olivinas no manto superior, que permite a transformação mineralógica típica de retrometamorfismo (Oliveira, 1980). Assim, a olivina, bastante instável graças a sua estrutura cristalina e seu alto conteúdo em magnésio e ferro, facilmente se altera sob as novas condições de hidratação. A trama original da rocha transforma-se em sua maioria em serpentina, carbonatos, brucita e magnetita. Diante disso, houve a primeira remobilização do níquel, que substituindo o magnésio, passou do retículo da olivina para o da serpentina, conservando neste último o mesmo teor de níquel do mineral primário (0,3% NiO).

Com a exumação do domo ultramáfico durante a peneplanização que ocorreu durante o Paleógeno, ocorreu a geração de vales profundos e um domínio de cristas e escarpas e/ou chapadas, numa superfície bastante dissecada (Silva, 2009), denominadas de Superfície Paleogênica (De Martonne, 1943), Nível A (Freitas, 1951), Ciclo Sul-Americano (King, 1956) e PdVII (Barbosa, 1959).

O Paleógeno representou um período de certa estabilidade durante o processo de aplainamento, assim, o intemperismo conduziu à formação de uma cobertura de alteração. Nos setores intermediários do perfil de alteração, acima do dunito serpentinizado, ocorreu a silicificação. A sílica oriunda da olivina e serpentina precipita preenchendo fraturas sob forma

de opala e calcedônia (Neto, 2011), ou associada ao magnésio e ao níquel formando filossilicatos da série pimelita-kerolita, ambas podem ser descritas como fases com afinidade para o talco com água extra em sua estrutura (Choque Fernandez, 2018). Esse fenômeno está correlacionado a uma circunstância de clima mais seco durante o período citado (Oliveira, 1980).

Em seguida, sob um episódio de clima de temperaturas altas, ocorreu a lateritização de forma generalizada, e na porção inferior da zona oxidada então formada, o níquel e cobalto concentraram-se residualmente por lixiviação da sílica e magnésio (Neto, 2011; Oliveira, 1980). Durante o Neógeno, houve um novo ciclo de erosão que originou um relevo ondulado e pedimentado, e é considerado o mais extenso aplainamento do país e identificado por Oliveira (1980) e King (1965) como Ciclo das Velhas. A superfície Sul-Americana (Valadão, 1998) foi pouco a pouco sendo modificada de forma mais ativa onde a silicificação era menos intensa e inexistente. O resultado desse processo foi a formação de um relevo sustentado pela camada de sílica mais resistente, contrapondo as regiões mais rebaixadas, onde houve o acúmulo do produto do intemperismo e erosão ocorridos anteriormente.

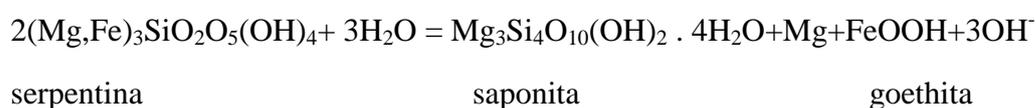
Assim, no Pleistoceno, a fase de agradaciao do Ciclo Velhas gerou uma nova superfície de aplainamento, contudo uma parte do maciço resistiu ao nivelamento formando o relevo-testemunho (Oliveira, 1980). A partir desse período, a superfície citada passou por meteorização, sob controle da ação do clima tropical atual. As alternâncias nas estações mais secas e úmidas, com temperaturas altas, favoreceram o intemperismo das rochas ultramáficas e o acúmulo de níquel no perfil de alteração (Neto, 2011).

▪ EVOLUÇÃO DO PERFIL LATERÍTICO

A evolução do perfil laterítico se inicia pela hidrólise da olivina, juntamente com a lixiviação e posterior precipitação nas fraturas e falhas do dunito, de sílica na forma de calcedônia e opala, ou associado ao magnésio e níquel como “talco” hidratado. Processo similar, porém com menor intensidade, ocorreu durante a fase mais seca do ciclo Sul-Americano anteriormente citado. O resultado deste processo é a formação de um material amorfo constituído de silício e ferro. A serpentina mantém sua estrutura e é recoberta por uma película ferruginosa originada pela liberação do ferro no sistema. O pH na base do perfil é alcalino, o que permite a precipitação do níquel na forma de hidróxido (Oliveira, 1980).

Com o avanço do intemperismo, a drenagem no perfil torna-se mais eficaz e a alteração intempérica prossegue. Da base para o topo, os minerais de serpentina são gradualmente mais intemperizados e apresentam-se com conteúdo de magnésio menos acentuado (Neto, 2011). Desta forma, há uma nova liberação do níquel, e também, de forma mais acentuada, do silício e magnésio. O ferro permanece no perfil, além de outros elementos como cromo, cobalto, manganês, alumínio e cobre, sendo comuns suas concentrações em determinados horizontes.

A goethita cristaliza-se sendo capaz de abrigar em sua estrutura o níquel, isso ocorre devido à baixa mobilidade geoquímica deste elemento. Esses estágios iniciais são descritos nas equações elaboradas por Neto (2011):



serpentina

saponita

goethita

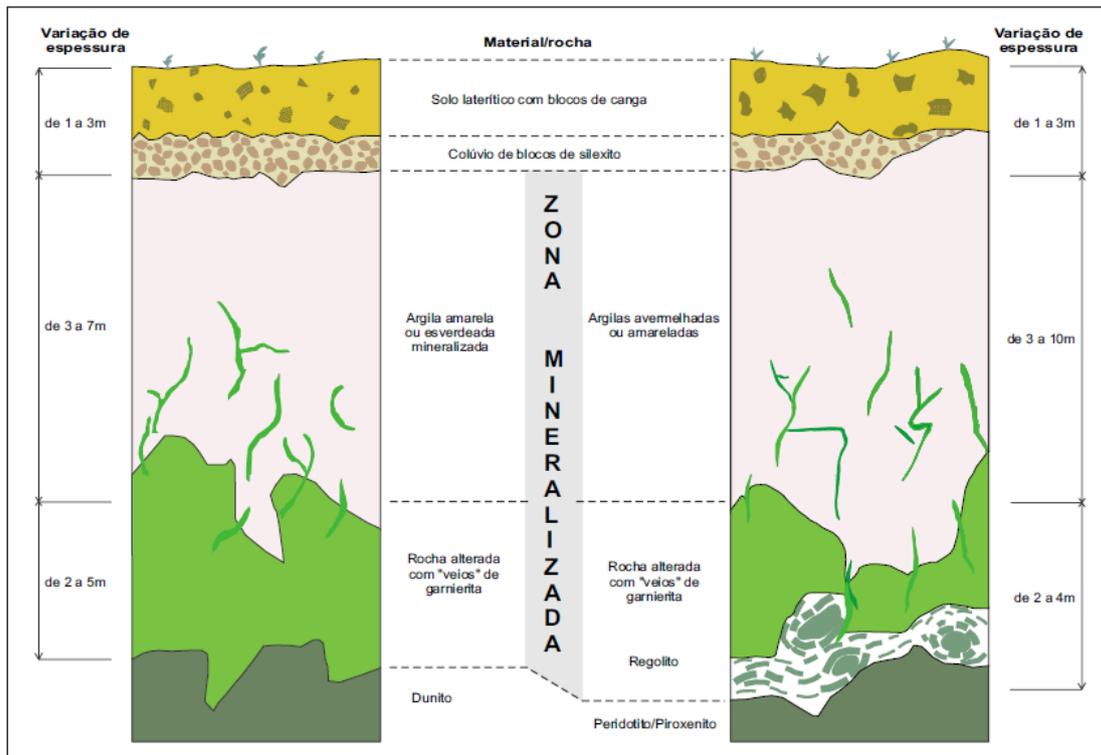


goethita com níquel absorvido

Caso a rocha-mãe contenha uma alta concentração de piroxênio, forma-se uma fase silicatada provisória, representada pela nontronita, que também pode abrigar o níquel em sua estrutura. Com o avançar da ação intempérica este mineral é decomposto e forma-se a goethita e hematita.

A partir desta fase, a trama original da rocha apresenta-se modificada, com mais de 70% de minerais oriundos da alteração intempérica. O processo incessante de alteração dos óxidos de ferro acarreta na dissolução e reprecipitação, lixiviando o níquel, e permitindo acumular em outra fase mineral, composta por argilominerais, acumulando em suas fraturas do meio para base do perfil (Figura 12). Esse processo foi mais eficiente nas baixadas do terreno, mas ocorreu também nos sopés e encostas.

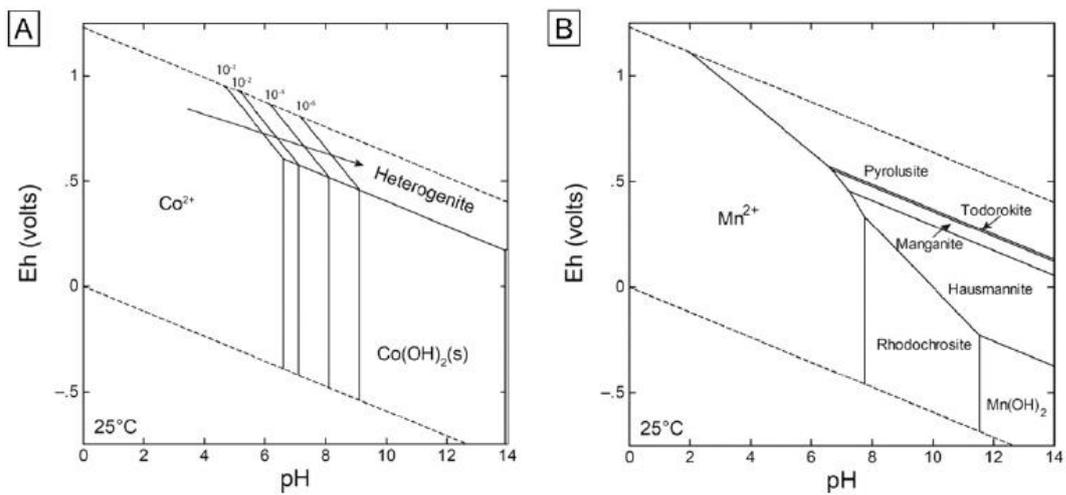
Figura 12 - A zona mineralizada do perfil laterítico de Morro do Engenho. Fonte: Radaelli, 2000.



O cobalto se assemelha ao níquel em muitas características físicas e químicas e, apesar de ocorrer de forma menos abundante, frequentemente, está presente junto com o níquel em uma variedade de minerais. Porém, o cobalto é facilmente solubilizado durante o intemperismo e ao contrário do níquel, não forma minerais silicáticos residuais e sua distribuição no perfil é determinada pela afinidade geoquímica com o ferro e manganês em suas fases oxidadas (Turekian, 1974).

Segundo Norvell (1988) no perfil de solo, o Co, juntamente com o Mn, participam de diversas reações dentre elas: precipitação, troca iônica, e adsorção específica. A distribuição entre solução e fase sólida está fortemente relacionada com pH (*apud Suppi, 2018*). De acordo com Ernani (2008 *apud Suppi, 2018*), quanto maior o pH, menor é o teor de Co e Mn na solução do solo (Figura 13), pois há o aumento da adsorção específica e precipitação desse elementos. Em solos com baixo fornecimento de oxigênio, ocorrem reações de redução do Mn, o que aumenta sua concentração na solução do solo, e sob estas circunstâncias, o teor de Co na solução também aumenta. Logo, em solos com baixo pH e/ou baixa disponibilidade de oxigênio, a mobilidade do Co e Mn aumenta (Ernani, 2008 *apud Suppi, 2018*).

Figura 13 - Diagramas de estabilidade de eH x pH a 25°C para Co (A), a seta mostra o deslocamento do campo de estabilidade de heterogenita para diminuir a atividade do elemento; e Mn (B) no sistema aquoso. Fonte: Decrée *et al.*, (2015).

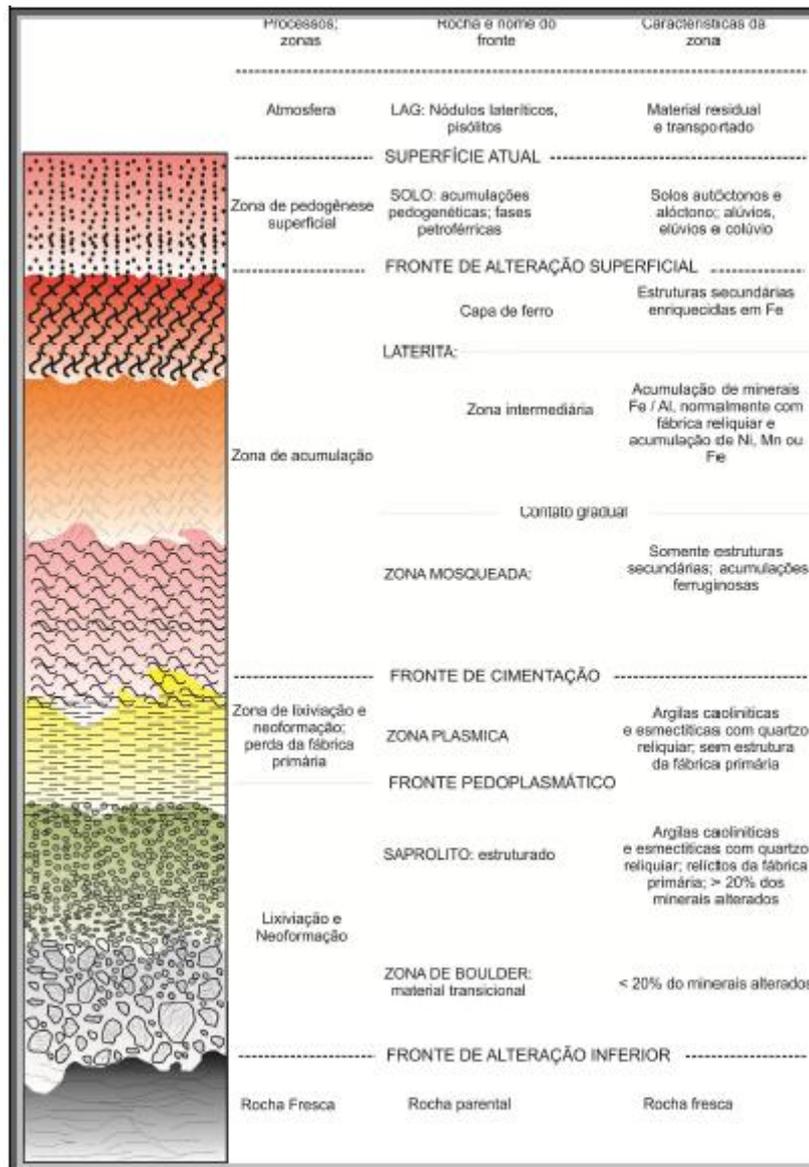


5. RESULTADOS

5.1 ASPECTOS DO PERFIL LATERÍTICO DE MORRO DO ENGENHO

Num modelo idealizado, Aleva (1994, p. 26) descreve de forma generalizada as zonas que compõem o denominado perfil laterítico.

Figura 14 - Processo idealizado de formação de perfil laterítico-saprolítico. Fonte: Aleva (1996).



Assim, o perfil de alteração é composto por material autóctono, alóctono ou a mistura de ambos. A generalização do material que consiste este perfil de alteração é denominado regolito (Eggleton, 2001, p. 101). O material alóctono é o produto da alteração, erosão e denudação de áreas topograficamente elevadas, os quais, após o transporte, são depositados por ação fluvial, eólica e coluvial (Aleva, 1994, p. 24). Ainda de acordo com o mesmo autor,

as fácies autóctones do regolito são representadas pela alteração *in situ* da rocha parental, mantendo características originais, sendo, em parte, transformadas em lateritos. O resultado dessas alterações demonstram características organizacionais em zonas singulares, compondo o perfil laterítico da área.

A base do perfil de alteração, denominado rocha parental, é em suma maioria, formada pelo dunito (Foto 8), com densidade variável devido ao grau de serpentização, assim apresenta somente resquícios da mineralogia primária, sendo o teor de Ni, normalmente, abaixo do valor economicamente viável. Esta aparece em furos de sondagem descritos, a profundidades superiores a 20 metros, passando gradualmente para um saprolito de textura grossa. O perfil também se desenvolve sobre o harzburgito (Foto 9), de forma menos expressiva.

Foto 8 - Dunito descrito no furo MC-130-GO. Fonte: Da autora (2020).



Foto 9 - Peridotito-harzburgito descrito no furo MC-46-GO. Fonte: Da autora (2020).



O fronte de alteração inferior surge a partir da zona de Boulder, que equivale a fase intermediária entre a rocha fresca e a zona saprolítica (Foto 10). Caracteriza-se esta zona como rocha dura, na qual ao microscópio, há os primeiros indícios de alteração supergênica. A rocha apresenta-se como região parcialmente intemperizada, com menos de 20% de sua mineralogia susceptível a alteração, além de expor porções duras e coesivas alternadas com frações intemperizadas.

Foto 10- Dunitos do fronte de alteração descritos nos furos MC-81-GO e MC-130-GO, respectivamente. Fonte: Da autora (2020).



O saprolito, localizado acima das zonas anteriormente citadas, possui mais de 80% dos minerais originais completamente alterados, sendo estes, em sua maioria transformados em

minerais secundários hidratados (Foto 11), com espessura entre 2 a 5 metros. A zona saprolítica equivale à zona de maior enriquecimento em níquel no modelo da área.

Foto 11 - Saprolito desenvolvido sob o dunito descrito nos furos MC-53-GO e MC-130-GO. Fonte: Da autora (2020).



O fronte pedoplasmático foi caracterizado pela perda total das características da rocha primária, seguida pela geração dos argilominerais no topo do perfil. Em seguida, surge o fronte de cimentação formado essencialmente por minerais de argila (Foto 12). Trata-se de um intervalo estreito e descontínuo, bastante friável, apresentando coloração amarelada ou esverdeada quando o protólito se trata do dunito, e no caso do harzburgito, a coloração torna-se avermelhada ou amarelada.

Foto 12 - Zona plásmica desenvolvida sob o dunito denotando a perda total das características da rocha-mãe, ambos do furo MC-51-GO. Fonte: Da autora (2020).



Na parte inferior desta zona, alumínio, ferro, manganês, silício e níquel se acumulam na forma de óxidos e hidróxidos. Na zona laterítica, desenvolve-se couraças ferruginosas (Foto 13) graças ao processo de oxidação e redução, além de blocos de colúvio de silexito. Ambos são muito importantes, pois podem auxiliar como barreira geoquímica, no que tange a influência do lençol freático no desenvolvimento do perfil. Nesta região, o teor de níquel, em geral, é inferior ao *cut-off* praticado, $> 0,8\% \text{ Ni}$.

Foto 13 - Concreções ferruginosas desenvolvidas sob o dunito no furo MC-81-GO. Fonte: Da autora (2020).



Por fim, a superfície atual é formada pelos solos lateríticos desenvolvidos, sem valor econômico (Foto 14).

Foto 14 - Solo laterítico desenvolvido sob o furo MC-42-GO. Fonte: Da autora (2020).



a) Zona mineralizada

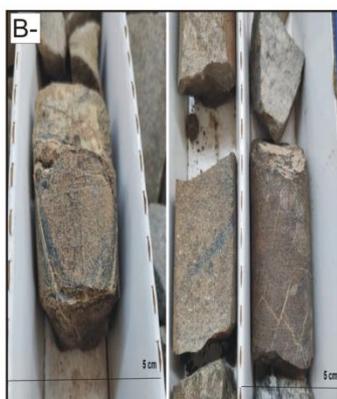
▪ Níquel

Das três litologias ultramáficas citadas, o teor de níquel é mais alto no dunito, atingindo cerca de 1,4% e 1,47%, médio no peridotito atingindo até 0,6% Ni e baixo no piroxenito, numa média de 0,2 a 0,4%. No caso do dunito, os teores de níquel evoluem da superfície até 17 metros de profundidade (Figura 15), alcançando valores médios superiores a 1%, decrescendo paulatinamente abaixo dessa profundidade, com algumas exceções como a apresentada no furo MC-130-GO, no qual apresentou as maiores porcentagens a partir de 51,60 metros de profundidade (Figura 16).

Figura 15 - Variação de teores de Ni dados pela XRF no furo MC-81-GO. Fonte: Da autora (2020).



A- 16,00 – 21,80m: Rocha intemperizada de granulação fina. XRF: 15,20% Mg; 1,00% Al; 9,71% Fe; 0,07% Co; 1,49% Ni.



B- 21,80 – 27,85 m: Dunito semi-intemperizado, cinza claro de granulação fina. XRF: 29,27% Mg; 0,53% Al; 9,50% Fe; 0,07% Co 0,18% Ni.

Figura 16 - Variação de teores de Ni dados pela XRF no furo MC-130-GO. Fonte: Da autora (2020).



A garnierita ocorre de forma disseminada, ou constituindo *stockworks* silicosos locais (Foto 15), ou formando vênulas nas rochas ultramáficas alteradas, com espessuras de alguns centímetros.

Foto 15 - Stockworks encontrado no furo MC-46-GO. Fonte: Da autora (2020).



Dessa forma, é possível classificar a mineralização do perfil de Morro do Engenho, como silicatado, no qual as garnieritas, produto desta alteração, são as portadoras da mineralização, e que comumente são encontrados do meio para a base do perfil, associadas ao nível argiloso.

- Cobalto

De acordo com os testemunhos analisados, os maiores teores de cobalto encontrados foram obtidos nos gabros (Figura 17), diferentemente do que ocorre com o níquel. Contudo, não há o descarte de altos teores nas demais litologias ultramáficas estudadas (Figura 18). Os teores evoluem da superfície até, em média, 7 metros e decrescem paulatinamente abaixo dessa profundidade.

Figura 17 - Variação dos teores de Co dada pela XRF no furo de rocha gabrónica, MC-112-GO. Fonte: Da autora (2020).

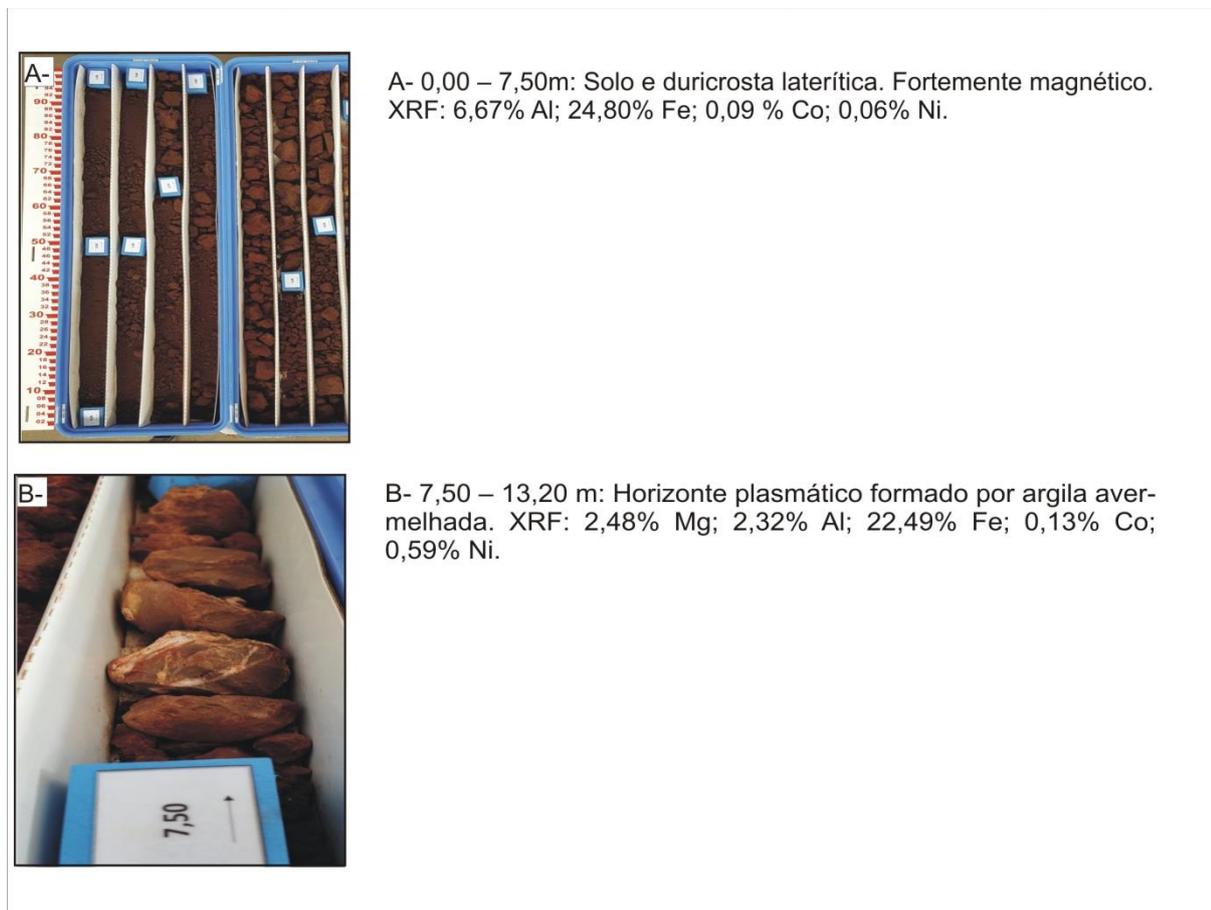
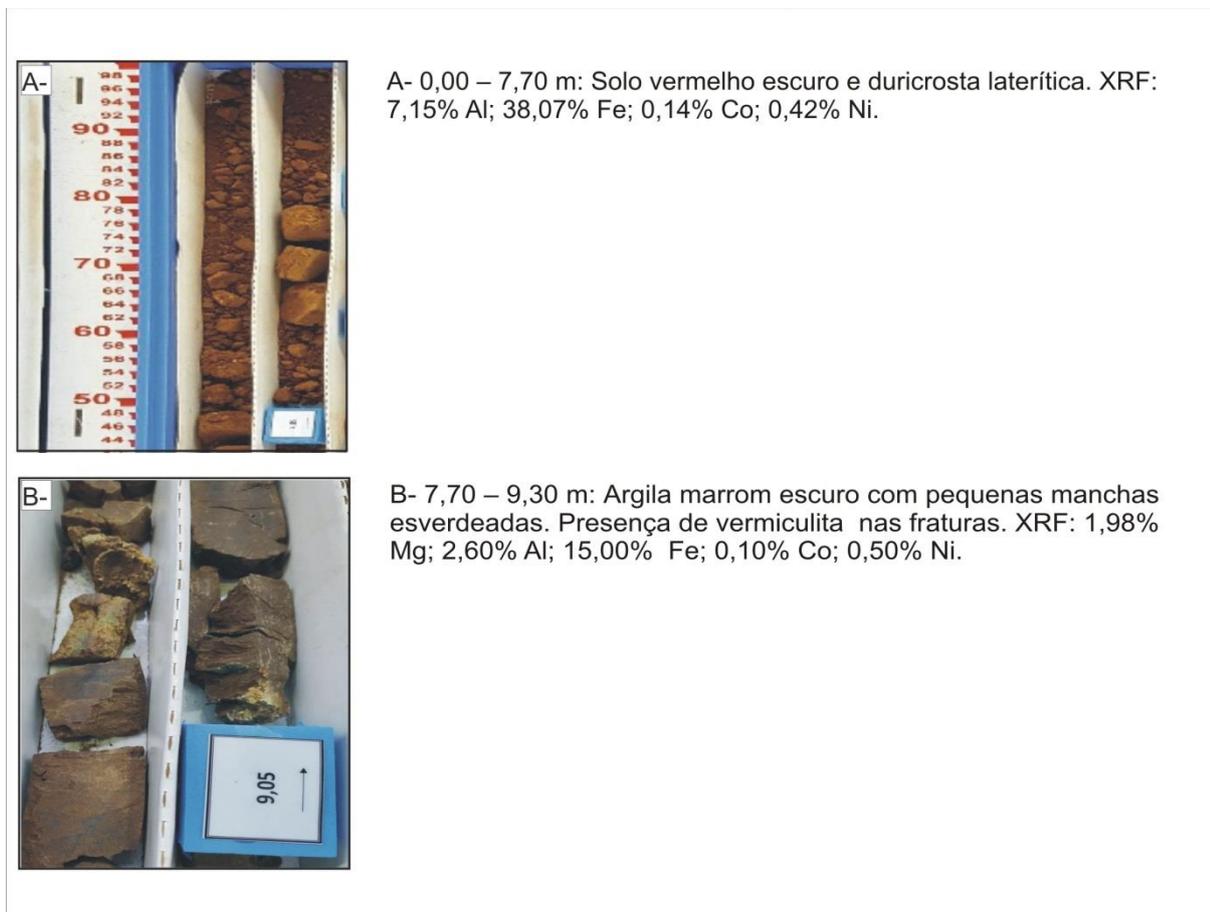


Figura 18 - Variação dos teores de Co dada pela XRF no furo de peridotito-piroxenito, MC-46-GO. Fonte: Da autora (2020).



Hospedado anteriormente na olivina e serpentina, o Co pode estar associado à goethita recém-formada substituindo o ferro na estrutura de óxido, no saprólito. Já no horizonte plasmático, responsável pelas maiores concentrações de cobalto, apresenta-se na forma de asbolano (óxido de Mn), reconhecido por sua coloração escura nos furos.

O asbolano ocorre em geral, nas fraturas (Foto 16) ou, por vezes, formando uma textura lenticular preta, como bandas (Foto 17).

Foto 16 - Asbolano encontrado nas fraturas do furo de gabro MC-100-GO. Fonte: Da autora (2020).



Foto 17 - Textura lenticular preta composto por asbolano descrito no furo gabróico MC-100-GO. Fonte: Da autora (2020).



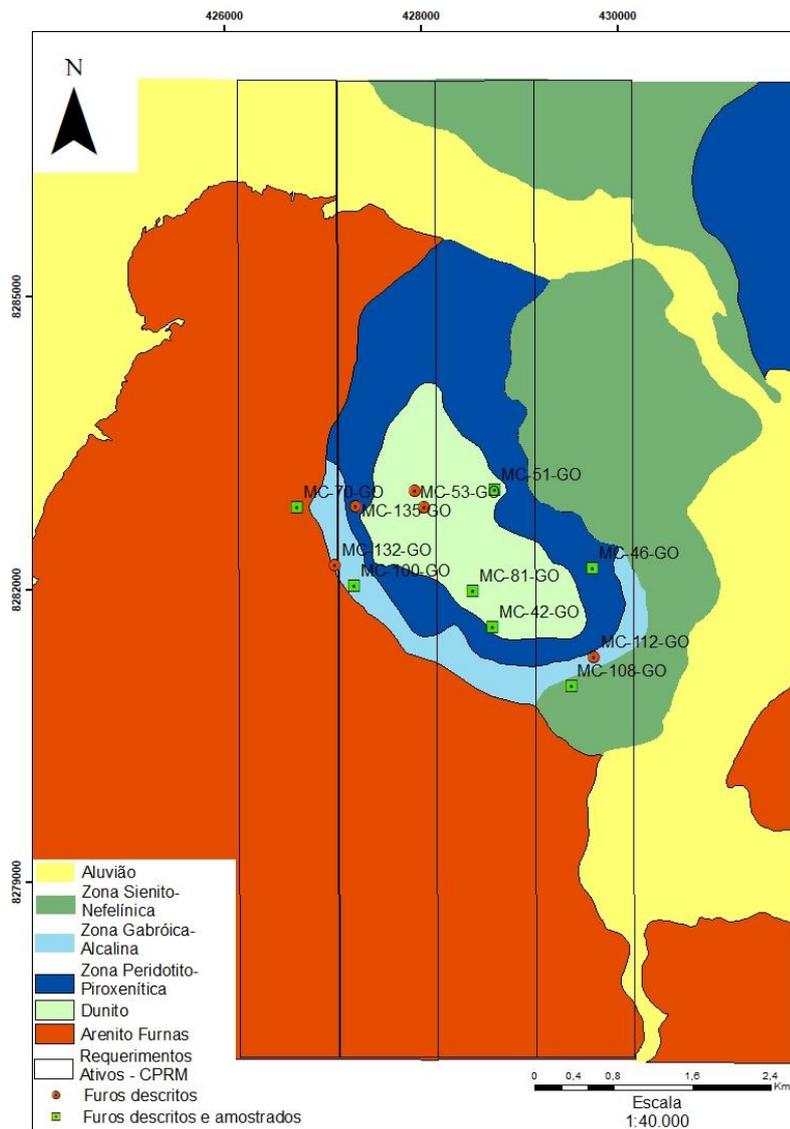
5.2 DESCRIÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM E PETROGRAFIA

Neste tópico serão abordadas as unidades geológicas que compõem a área investigada. Objetiva-se uma melhor compreensão do quadro geológico local a partir da integração dos dados advindos da caracterização mineralógica macroscópica e petrográfica executada neste trabalho.

Buscando a caracterização geológica do Complexo Morro do Engenho através do estudo de cada uma das litologias que compõem o corpo intrusivo zonado, foram selecionados 12 furos de sondagem, distribuídos nas diferentes litologias, conforme o mapa geológico de subsuperfície (Figura 19), os quais, de acordo com as características descritas nos boletins de sondagem do projeto Morro do Engenho, constituem os furos mais representativos de cada litologia. Foi realizada descrição completa dos 12 furos selecionados, medições com XRF e em 7 furos foram coletadas amostras para análises químicas e petrográficas. A relação completa dos furos selecionados é composta por: MC-100-GO, MC-108-GO, MC-112-GO, MC-130-GO, MC-132-GO, MC-135-GO, MC-42-GO, MC-46-GO, MC-51-GO, MC-53-GO, MC-70-GO e MC-81-GO.

A seguir, são apresentadas as informações coletadas para cada zona litológica a partir dos furos correspondentes a estas zonas.

Figura 19 - Mapa geológico de subsuperfície exibindo a distribuição dos furos de sondagem selecionados para estudo. Fonte: Modificado de Chaban *et al.*, (1975).



I) PALEOZOICO

▪ Formação Furnas (Rocha encaixante)

Os arenitos estudados no furo de sondagem MC-70-GO mostram o comportamento desta rocha em contato com as intrusivas, exibindo feições de metamorfismo de contato, apresentando características singulares. A cor torna-se cinza-escuro, de granulometria média a fina, compacto, de aspecto sacaroide, esfericidade média, subarredondado.

- MC-70-GO

O furo MC-70-GO (figura 20) representa a rocha encaixante da intrusão do complexo Morro do Engenho, pertencente à Formação Furnas no contexto da Bacia do Paraná. Os primeiros metros são dominados por solo róseo com fragmentos de rocha intemperizada, passando a partir dos 14,80 metros para argila cinza esverdeada. A partir de 27,25 metros, ocorre quartzito intemperizado de cor cinza esverdeada, rico em mica e com alto grau de fraturamento. A mesma litologia persiste até 34,40 metros, onde passa para rocha intemperizada, cinza esverdeada, argilosa, com abundância de minerais micáceos, bastante fraturada, com tons esbranquiçados dados pela alteração, minerais escuros dispersos e ligeira orientação mineral. Trata-se de possível dique máfico que corta o quartzito da formação Furnas, contemporâneo à intrusão do complexo Morro do Engenho.

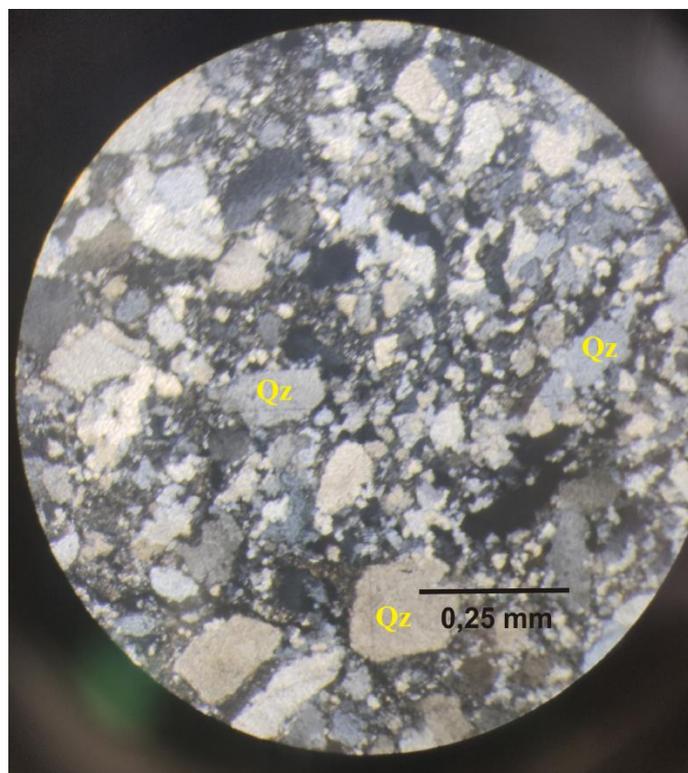
Figura 20 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-70-GO. Fonte: Da autora (2020).



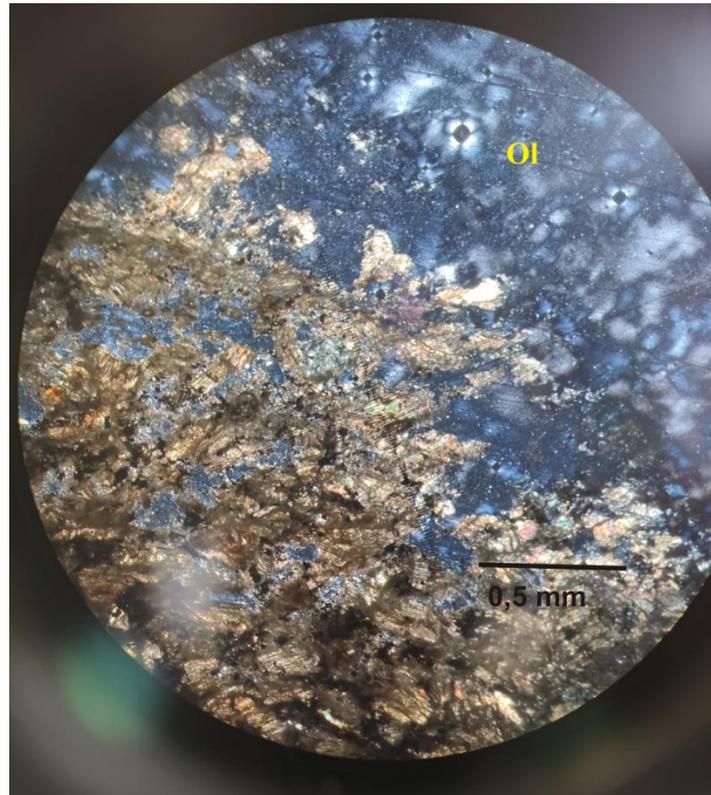
A- 8,20 - 14,80m: Solo róseo areno-argiloso. B- 14,80 - 27,25m: Argila cinza esverdeada com faixas esbranquiçadas. XRF: 8,91% Al; 10,52% Fe; 0,08% Co; 0,03% Ni. C- 27,25 - 28,85m: Rocha intemperizada, cinza esverdeada, argilosa. XRF: 4,38% Mg; 5,48% Al; 11,99% Fe; 0,08% Co; 0,12% Ni. D- 28,85 - 34,50m: Quartzito marrom escuro, bastante fraturado. E- 34,40 - 38,30m: Rocha intemperizada, argilosa, com orientação. Possível dique máfico. XRF: 4,35% Al; 8,45% Fe; 0,06% Co; 0,01% Ni. F- 38,30 - 44,30m: Intervalo sem recuperação. G- 44,30 - 46,80m: Quartzito cinza escuro. XRF: 4,30% Mg; 9,63% Al; 9,34% Fe; 0,06% Co; 0,02% Ni. H - 46,80 - 50,00m: Quartzito cinza bastante fraturado. XRF: 2,23% Al; 0,30% Fe; 0,003% Ni.

Ainda no furo MC-70-GO a rocha do intervalo de 48,44 metros, em lâmina delgada, é caracterizada como quartzito compacto, grãos angulosos de quartzo, uniformemente distribuídos, densamente agrupados e sem qualquer orientação (Fotomicrografia 1). Alguns grãos apresentam extinção ondulante, além de microfissuras. Foi confirmada a presença de dique de rocha básica intensamente intemperizada cortando camadas sedimentares da Formação Furnas na descrição microscópica (Fotomicrografia 2). Contudo, seu alto grau de intemperismo dificultou a análise, sendo possível apenas averiguar a existência de piroxênio, olivina e máficos em sua composição modal.

Fotomicrografia 1 - Quartzito com grãos de quartzo (qz) uniformemente distribuídos, sem qualquer orientação.
Fonte: Da autora (2020).



Fotomicrografia 2 - Rocha básica intensamente intemperizada. Fonte: Da autora (2020).



II) MESOZOICO

- Província Alcalina de Goiás
 - a) Zona dunítica

Esta rocha exhibe em afloramento, coloração cinza-esverdeado, granulação fina, com núcleos de cristais de olivina alterados para serpentina. Apresenta vênulas esverdeadas e azuladas, possivelmente formadas por garnieritas (Foto18).

No presente estudo, a análise do furo de sondagem, mostrou a presença de fraturas preenchidas por material silicificado, as quais formam texturas de rendilhamento fino, além de finos veios compostos por material carbonático.

Foto 18 - Dunito pouco intemperizado de coloração cinza-esverdeado com vênulas de garnierita. Fonte: Eduardo M. Grissolia (2018).



- MC-53-GO

O furo MC-53-GO, apresentado na figura 21, contém nos seus primeiros metros, solo argiloso de coloração avermelhada, composto por concreções ferruginosas, restos vegetais e blocos de rocha intemperizada. A partir de 4,70 metros, passa a uma rocha muito intemperizada, bastante friável, de composição argilosa, coloração alaranjada e aspecto poroso que concede à rocha uma baixa densidade. Esta porosidade é provavelmente produzida por insetos bioconstrutores. À medida que se avança em profundidade, a coloração alaranjada se torna mais intensa, em resposta ao maior teor de Fe identificado pelo XRF portátil. Estas características se mantêm até 13,40 metros, onde a tonalidade da rocha passa para tons rosados até que em 14,80 metros, assume uma coloração cinza claro e torna-se mais coesa, indicando diminuição no grau de intemperismo. Neste trecho são visíveis estruturas da rocha parental preservadas, vênulas milimétricas a centimétricas de silexito e zonas esverdeadas, possivelmente garnierita. Ocorre uma queda no teor de Fe e aumento no teor de Mg. A partir de 25,80 metros de profundidade, a rocha apresenta granulação muito fina, onde é possível identificar a presença de minerais máficos como magnetita e piroxênio. O fraturamento é mais intenso, sendo preenchido por quartzo, e por vezes, magnetita. Estas estruturas se intensificam e aumentam de tamanho à medida que se avança em profundidade, dando um aspecto “bandado” à rocha. Nesta zona, há um destaque para os teores de Mg que permanecem altos até o final do furo. Entre 39 e 47 metros, ocorre um dique de diabásio de coloração castanho

avermelhado, bastante fragmentado e magnético, composto por micas, quartzo e óxidos. O dunito semi-intemperizado é observado mais claramente a partir de 47 metros até a profundidade final do poço, em 51,70 metros. Tem cor cinza esverdeada, granulação fina, sem qualquer orientação. Apresenta-se bastante fraturado, sendo as fraturas preenchidas por magnetita ou por níveis de quartzo, formando textura do tipo rendilhada. Os níveis de silicite podem atingir até 1,5 centímetros. A rocha apresenta forte magnetismo.

Figura 21 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-53-GO. Fonte: Da autora (2020).



A- 0,00 - 4,70 m: Solo argiloso. XRF: 5,64% Fe; 0,04% Ni. B- 4,70– 12,70 m: Rocha intemperizada. XRF: 0,49% Al; 6,81% Fe; 0,03% Co; 0,05%Ni. C- 12,70 - 13,40 m: Rocha intemperizada. XRF: 1,44 % Mg; 0,86% Al; 24,09% Fe; 0,35% Ni.D- Rocha intemperizada. XRF: 11,23% Mg; 0,32% Al; 12,50% Fe; 0,07% Co; 1,55% Ni.E- 14,80 – 18,10 m: Rocha intemperizada. XRF: 18,08% Mg; 0,33% Al; 6,26 % Fe; 0,05% Co; 0,17% Ni.F- 18,10 – 19,70 m: Manchas esverdeadas. XRF: 14,71% Mg; 0,24% Al; 3,97% Fe; 0,04% Co; 0,13% Ni. G- 19,70 – 20,80 m: Rocha intemperizada. XRF: 1,07% Mg; 0,10% Al; 6,68% Fe; 0,02% Co; 0,18% Ni. H- 20,80 – 23,00 m: Baixa recuperação. I- 23,00 - 25,80m: Rocha muito intemperizada, cinza.XRF: 13,60% Mg; 1,25% Al; 7,63% Fe; 0,06% Co; 0,21% Ni.



J- 25,80 – 27,00 m: Rocha intemperizada de granulação muito fina. XRF: 17,82% Mg; 0,35% Al; 8,21% Fe; 0,06% Co; 0,21% Ni. L- 27,00 – 28,40 m: Rocha intemperizada cde granulação fina com magnetita e piroxênio. XRF: 18,23% Mg; 0,28% Al; 5,47% Fe; 0,04% Co; 0,20% Ni. M- 28,40 – 29,50m Forte presença de argilominerais. XRF: 20,27% Mg; 0,58% Al; 7,16% Fe; 0,05% Co; 0,19% Ni. N- 29,50 – 34,70 m: Venulações de quartzo. XRF: 24,33% Mg; 0,20% Al; 6,32% Fe; 0,04% Co; 0,18% Ni. O- 34,70 – 39,00 m: Rocha intemperizada com garnierita. XRF: 16,75% Mg; 0,17% Al; 7,09% Fe; 0,03% Co; 0,31% Ni. P- 39,00 – 47,00 m: Intervalo de baixa recuperação. XRF: 6,36% Mg; 3,36% Al; 11,69% Fe; 0,04% Co; 1,88% Ni. Q- 47,00 – 51,70 m: Dunito semi-alterado, fortemente magnético. XRF: 17,65% Mg; 0,16% Al; 5,43% Fe; 0,04% Co; 0,27% Ni.

- MC-130-GO

O furo MC-130-GO descrito na figura 22 apresenta, até 51,60 metros, solo laterítico, de cor vermelho, bastante argiloso, também composto por fragmentos de rochas, concreções ferruginosas e restos vegetais. Neste intervalo foram registrados altos teores de Fe e Co. Entre 51,60 e 65,30 metros ocorre rocha muito intemperizada de coloração rosada com aspecto pulverulento e fortemente magnética. Destacam-se os altos teores de Ni, atingindo até 1,71%, e Co chegando a 0,11%. A partir de 65,30 metros é possível identificar o dunito intemperizado de coloração verde acinzentada, granulação média e magnetismo alto. Possui vênulas de quartzo milimétricas a centimétricas. É constituída essencialmente por olivina (80%), além de minerais máficos.

Figura 22 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-130-GO. Fonte: Da autora (2020).



- MC-51-GO

O MC-51-GO, apresentado na figura 23, compreende da superfície a 2,90 metros, solo laterítico exibindo coloração vermelha intensa, composto por concreções ferruginosas e restos vegetais, além de fragmentos de rocha intemperizada. A zona argilosa se inicia em 2,90 metros atingindo até 22,10 metros. Apresenta coloração desde avermelhada a tons esbranquiçados. É possível observar impregnações de óxidos, assim como de asbolano. Permanece sua natureza magnética, desta vez, mediana. Destacam-se os altos teores de Co entre 9,60 e 17 metros. Logo abaixo ocorre o dunito semi-intemperizado de coloração castanho avermelhado, com textura granular fina e vênulas de silixito, o qual, em função do menor grau de intemperismo, é melhor observado a partir de 22,10 metros até o final do furo. Apresenta abundância de minerais micáceos, possivelmente vermiculita, bem como clorita, serpentina e óxidos, apresentando forte magnetismo. Entre 25,75 metros a 30,80 metros, foi constatada a ocorrência de vênulas centímetricas de cromita. Relevantes teores de Ni foram registrados, principalmente entre 10,75 a 22,10 metros.

Figura 23 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-51-GO. Fonte: Da autora (2020).



A- 0,00 – 2,90 m: Solo vermelho. XRF: 3,91% Al; 34,19% Fe; 0,36% Fe. B- 2,90 – 6,00 m: Argila avermelhada. XRF: 9,60% Al; 3,89% Fe; 0,04% Co; 0,56% Ni. C- 6,00 – 6,90m: Argila, magnetismo mediano. XRF: 6,09% Al; 11,50% Fe; 0,07% Co; 0,41% Ni. D- 6,90 – 9,60 m: Argila castanho escuro. XRF: 4,17% Al; 10,28% Fe; 0,07% Co; 0,54% Ni. E- 9,60 – 10,75 m: Argila marrom escura com garnierita. XRF: 3,52% Mg; 1,76% Al; 29,07% Fe; 0,13% Co; 0,62% Ni. F- 10,75 – 17,00 m: Argila marrom fortemente magnética. XRF: 2,47% Mg; 0,09% Al; 35,13% Fe; 0,10% Co; 0,89% Ni. G- 17,00 – 22,10 m: Variação de coloração da argila. XRF: 3,71% Mg; 4,88% Al; 8,59% Fe; 0,05% Co; 1,18% Ni. H- 22,10 – 25,75 m: Rocha intemperizada. XRF: 4,43% Mg; 0,89% Al; 25,09% Fe; 0,09% Co; 0,39% Ni. I - 25,75 - 30,80 m: Dunito semi-intemperizado. XRF: 22,90% Mg; 0,63% Al; 10,65% Fe; 0,07% Co; 0,20% Ni.

- MC-81-GO

Os primeiros 4 metros são caracterizados por solo laterítico de cor castanho avermelhado, classificado na fração argila, também composto por restos vegetais e concreções ferruginosas. A partir de 16 metros, ocorre rocha semi-intemperizada de cor cinza claro, granulação fina, composta por óxidos e minerais máficos. Possui vênulas milimétricas de sílica e impregnações de asbolano. Com o avanço da alteração, a coloração varia, tornando-se mais esbranquiçada, por vezes, esverdeada ou marrom-pálida. Nesta fase, só é possível identificar óxidos e quartzo como resistatos. A alteração argílica é frequentemente encontrada a partir dos 4 até 21,80 metros. Teores de Ni de até 1,49% são registrados entre 21,80 e 27,85 metros, como mostra a figura 24.

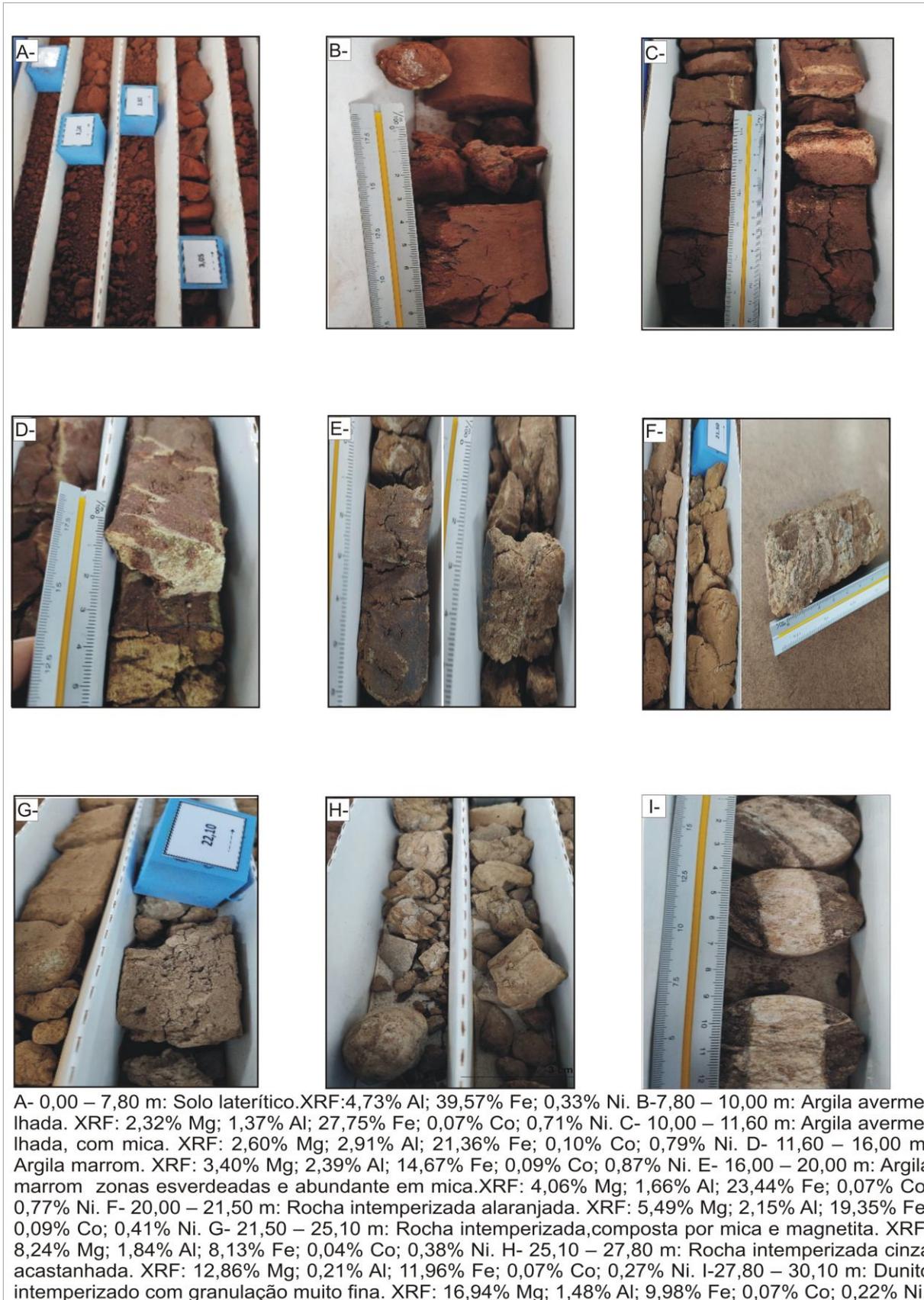
Figura 24 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-81-GO. Fonte: Da autora (2020).



- MC-42-GO

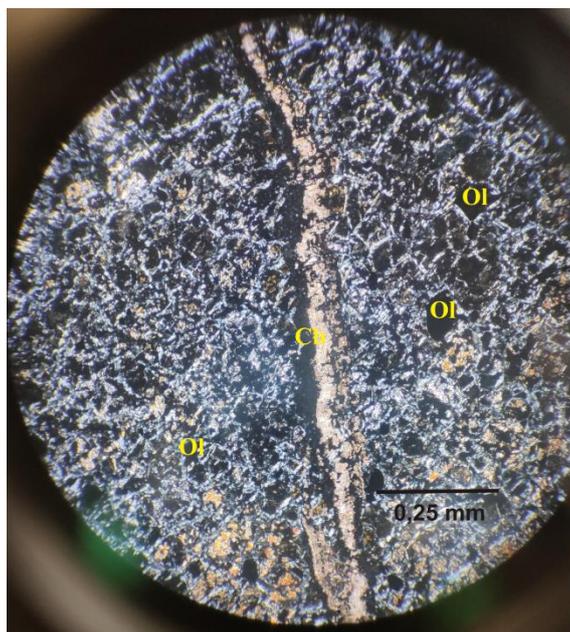
O furo MC-42-GO, vide figura 25, apresenta desde seu topo até 7,80 metros, o laterito de cor castanho avermelhado, fortemente magnético com alguma mica disseminada. Blocos de rocha e restos vegetais também são encontrados. Os intervalos subsequentes são dominados por uma zona argilosa de coloração avermelhada que varia gradualmente para tons amarronzados à medida que se avança em profundidade. São visíveis veios milimétricos a centimétricos preenchidos por sílica e/ou carbonato e zonas esverdeadas dominadas por mica, possivelmente vermiculita. Zonas escuras formadas por óxidos também ocorrem ao longo de todo intervalo argiloso. Nesta porção são registrados teores de Co na ordem de 0,1% e de Ni de até 0,87%. O dunito intemperizado possui coloração escura, argiloso e granulação muito fina. Composto por quartzo e mica em abundância, possivelmente vermiculita. Veios de carbonato e/ou sílica cortam toda a rocha e apresentam até 2 centímetros de espessura. A rocha apresenta alto grau de fraturamento.

Figura 25 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-42-GO. Fonte: Da autora (2020).

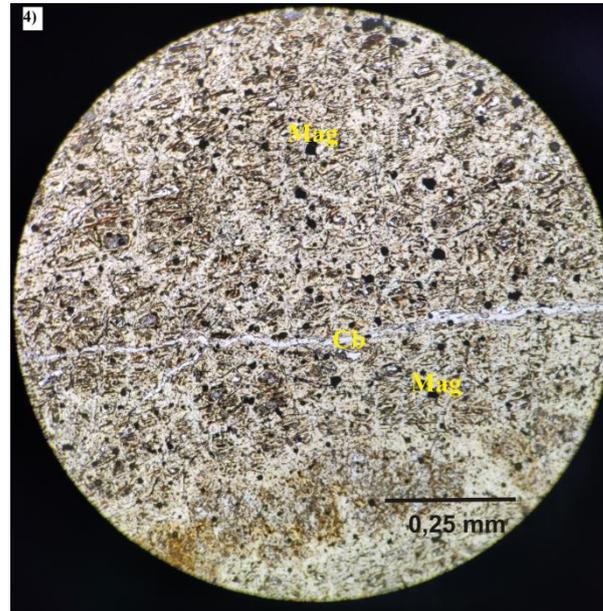


Microscopicamente, esta rocha exibe grãos anedrais de granulação média, intensamente fraturados, sendo composta essencialmente por olivina e seus produtos de alteração. O furo MC-42-GO apresenta núcleos de olivina preservados com serpentinização nas bordas formando textura em malha (Fotomicrografia 3), bem como a alteração à iddingsita. Já os furos MC-81-GO e MC-51-GO, possuem exclusivamente serpentina, por vezes, associada à magnetita ou vênulas de carbonato (Fotomicrografia 4 e 5), ou de forma placóide, ocupando os antigos núcleos de olivina. As finas e descontínuas venulações de carbonato, pouco abundantes, são encontradas de forma irregular nas lâminas. De acordo com Oliveira (1980), os carbonatos são descritos como magnesita e dolomita. A magnetita compõe 10-12% da composição modal. A classificação da nomenclatura, de acordo com Streckeisen (1976), confirmou a composição dunítica para esta litologia nos 3 furos mencionados (figura 28). A plotagem dos mesmos marcaram o topo do diagrama, contudo estes foram afastados para melhor visualização do dado.

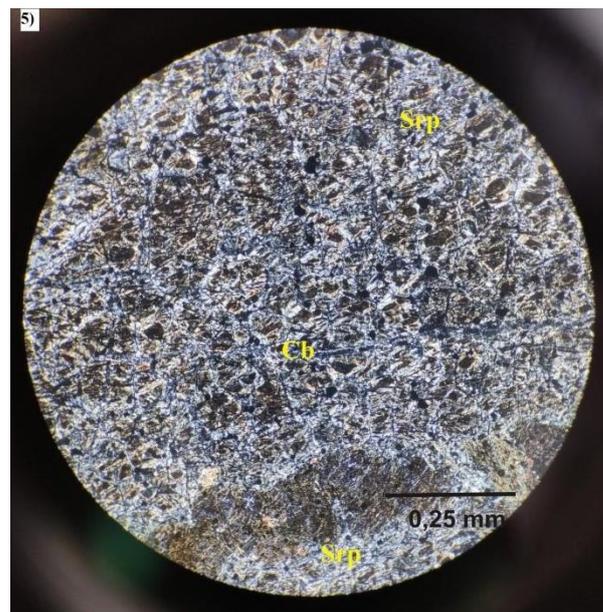
Fotomicrografia 3 - Núcleos de olivina (Ol) ainda preservados com suas bordas serpentinizadas. Vênulas de carbonato (Cb) encontram-se em destaque na lâmina. Fonte: Da autora (2020).



Fotomicrografia 4 - Xenomorfos de magnetita (Mag) associados às serpentinas. Vênulas de carbonato (Cb) também são encontrados. Fonte: Da autora (2020).



Fotomicrografia 5 – Pseudomorfos de olivina intensamente serpentinizados (Srp). Fonte: Da autora (2020).



b) Zona peridotito-piroxenítica

Nos testemunhos de sondagem observados, os peridotitos alterados apresentam coloração cinza escuro à preta, com porções avermelhadas e amareladas (furo MC-135-GO e MC- 46-GO). A textura afanítica dificulta a identificação mineralógica da rocha, porém é possível verificar a ocorrência de recortes de veios carbonáticos, além de serpentina e clorita.

- MC-135-GO

O furo MC-135-GO da superfície até 2 metros apresenta solo laterítico na cor vermelho escuro, composto por blocos de rocha, restos vegetais e concreções ferruginosas. A partir de 16 metros até 29 metros (profundidade total) distinguem-se duas litologias: a primeira correspondendo ao piroxenito semi-intemperizado de coloração escura, variando de cinza escuro a preto e textura afanítica; outra litologia apresenta tonalidade avermelhada e granulação fina, tratando-se provavelmente do peridotito. Ambas possuem alta densidade e com a evolução da alteração apresentam garnierita. As duas litologias ocorrem associadas, não existindo contato definido. Ocorre abundância de vênulas de quartzo e/ou carbonato de até 10 centímetros que produzem brechações englobando fragmentos da rocha. A porção avermelhada apresenta intenso magnetismo. Não são registrados teores elevados de Ni e Co ao longo de todo testemunho, como apresentado na figura 26.

Figura 26 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-135-GO. Fonte: Da autora (2020).

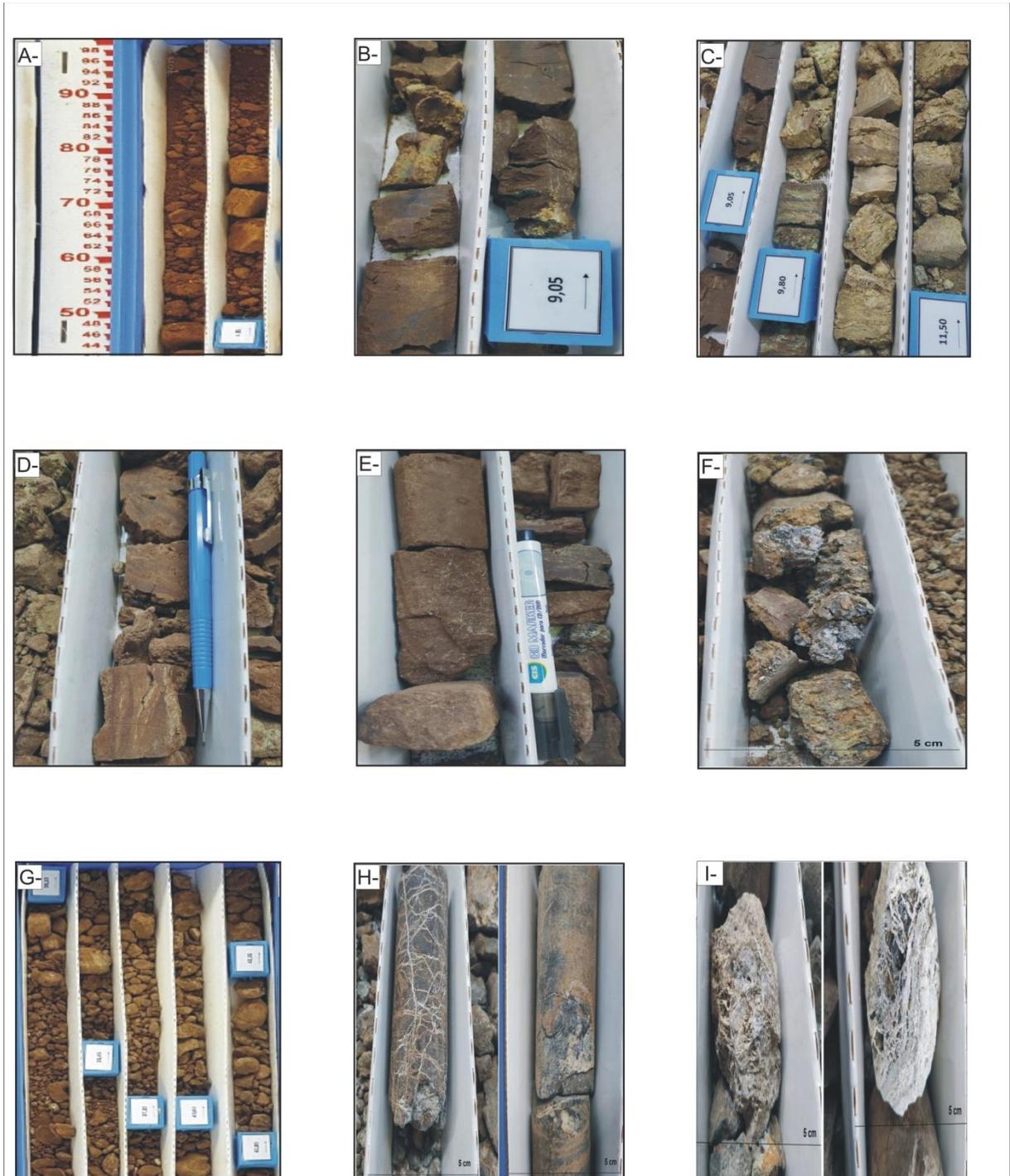


- MC-46-GO

O furo MC-46-GO apresenta da superfície a 7,70 metros concreções ferruginosas e blocos de rocha intemperizada. Com o intemperismo, a rocha apresenta uma coloração marrom, bem como, manchas esverdeadas, por vezes esbranquiçadas, com forte presença da argila e vermiculita, menos frequente com o avanço da profundidade. Fraturas também são descritas com veemência no intervalo de 34,40 a 46,20 metros. Apresenta intensa venulação de dimensões milimétricas a centimétricas, formando estruturas em *stockworks* e produzindo brechações na rocha. São compostos basicamente por quartzo, podendo conter também

carbonato, conforme identificado por meio de teste com HCl. Nas bordas das vênulas, é possível observar uma zonação da alteração da rocha formando bandas esverdeadas de clorita e/ou serpentina. A partir de 46,20 até 54,85 metros (profundidade total), a rocha se mostra semi-intemperizada, com coloração cinza escura, alta densidade e fortemente magnética. Não são registrados teores elevados de Ni e Co ao longo de todo testemunho, vide figura 27.

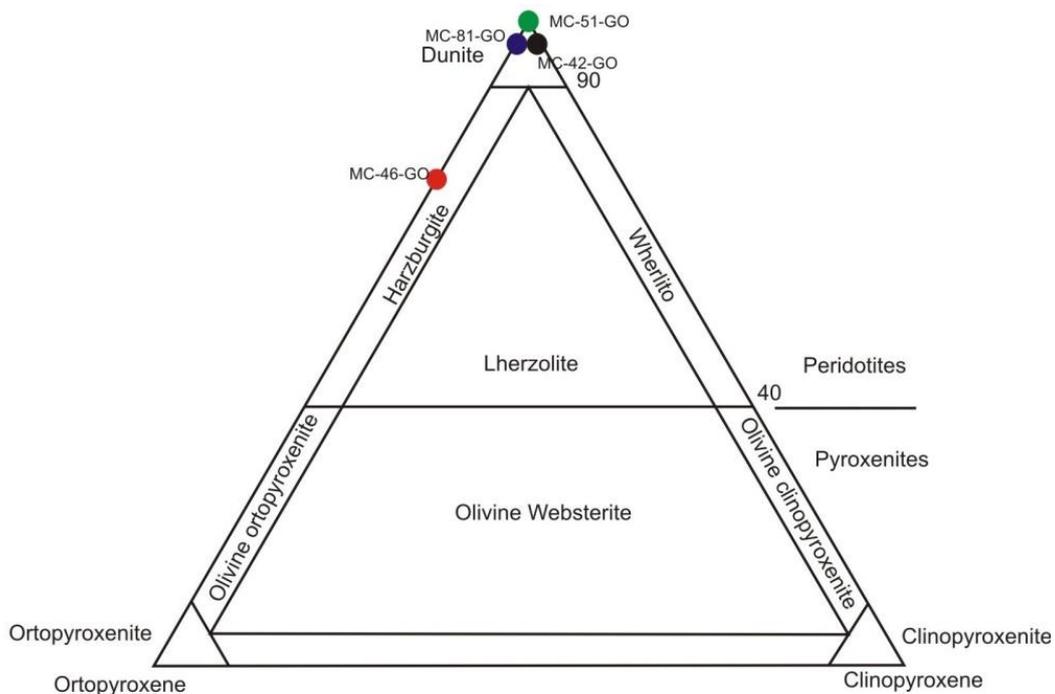
Figura 27 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-46-GO. Fonte: Da autora (2020).



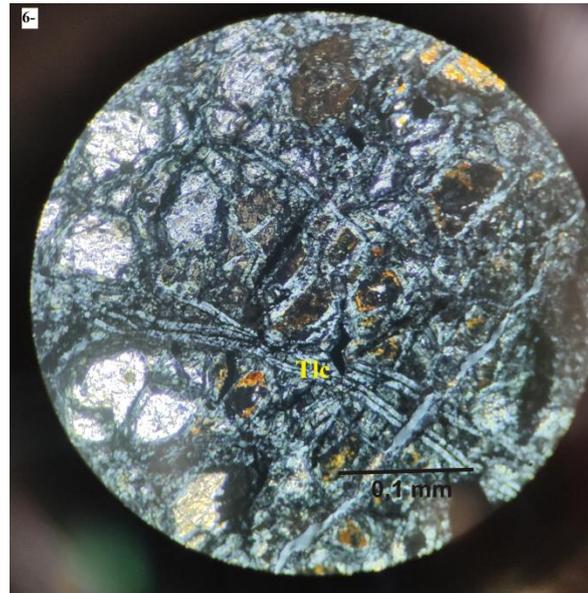
A- 0,00 – 7,70 m: Solo laterítico. XRF: 7,15% Al; 38,07% Fe; 0,14% Co; 0,42% Ni. B - 7,70 – 9,30 m: Argila marrom escuro. XRF: 1,98% Mg; 2,60% Al; 15,00% Fe; 0,10% Co; 0,50% Ni. C- 9,30 - 12,90 m: Argila com vermiculita. XRF: 3,82% Mg; 4,45% Al; 7,99% Fe; 0,04% Co; 0,86% Ni. D- 12,90 – 19,80 m: Argila marrom esverdeada. XRF: 4,34% Mg; 1,26% Al; 20,19% Fe; 0,09% Co; 0,21% Ni. E- 19,80 – 27,60 m: Rocha intemperizada. XRF: 3,13% Mg; 1,65% Al; 16,96% Fe; 0,08% Co; 0,17% Ni. F- 27,60 – 34,40 m: Presença da vermiculita. XRF: 2,89% Mg; 0,85% Al; 9,64% Fe; 0,09% Ni. G- 34,40 – 46,20 m Rocha intemperizada. XRF: 4,57% Mg; 2,11% Al; 15,80% Fe; 0,07% Co; 0,18% Ni. H- 46,20 – 52,85 m: Rocha semi-intemperizada. XRF: 8,87% Mg; 0,91% Al; 1,42% Fe; 0,01% Co; 0,03% Ni. I- 52,85 – 54,85m: Peridotito semi-intemperizado. XRF: 18,35% Mg; 3,49% Al; 11,44% Fe; 0,06% Co; 0,14% Ni.

O peridotito do furo MC-46-GO foi classificado como harzburgito, de acordo com o diagrama de classificação de peridotitos e piroxenitos de Streckeisen (1976 *apud* Le Maitre 2002, p. 28), (figura 28). Em lâmina delgada, é texturalmente hipiodiomórfico, de granulação média a grossa, composto por 40% de olivina serpentinizada, 30% de ortopiroxênio, 25% de magnetita, além de 3% de carbonato e 2% de talco (Fotomicrografia 6), estes últimos ocupando vênulas distribuídas de forma irregular. A olivina encontra-se intensamente fraturada e sua identificação é dada através de sua forma ovular característica, a qual se encontra ainda preservada. Os ortopiroxênios são anedrais a subedrais, fracamente fraturados, porém intemperizados. A magnetita é observada tanto nos intercumulus, como contida nos cristais de olivina dada como resultante do processo de alteração (Fotomicrografia 7).

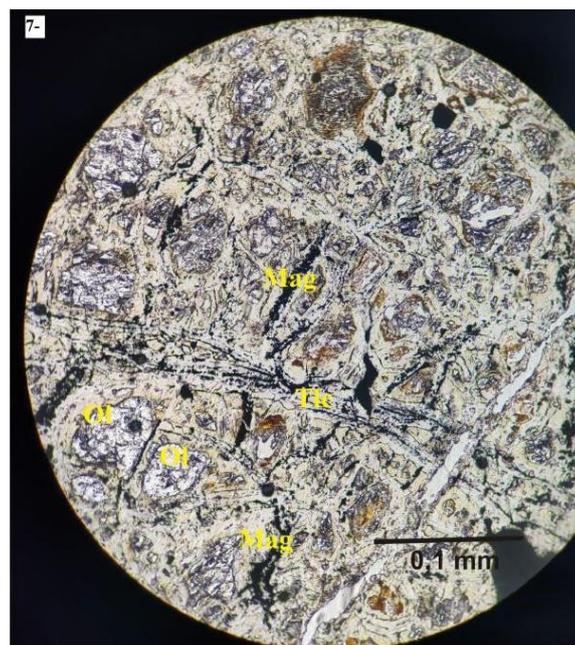
Figura 28 - Amostras dos furos da zona dunítica, peridotito-piroxenítica plotadas no diagrama de classificação de peridotitos e piroxenito de Streckeisen (1976 *apud* Le Maitre, 2002, p. 28).



Fotomicrografia 6 - Vênulas de talco (Tlc) distribuídas de forma irregular.



Fotomicrografia 7 - Olivinas (Ol) intensamente fraturadas e serpentinizadas. Além de magnetita (Mag) nos intercumulus como também inclusos em outros minerais. Fonte: Da autora (2020).



c) Zona gabroica

A zona gabroica apresenta rochas de coloração cinza-esverdeada, de granulação predominantemente média, textura sub-orientada (Foto 19), com veios milimétricos de carbonato e serpentina (furos MC-132-GO, MC-112-GO e MC-100-GO).

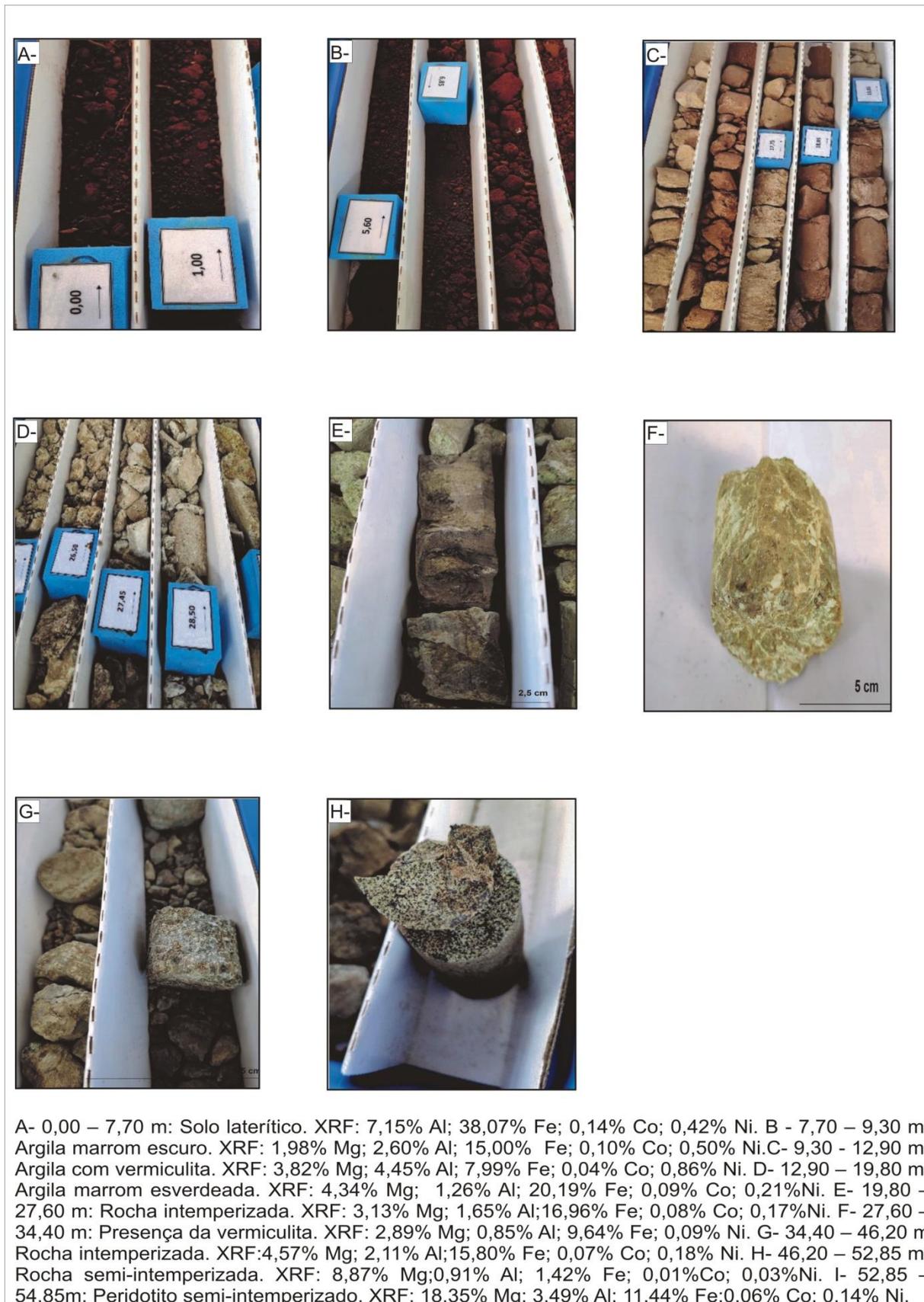
Foto 19 - Amostra de rocha gabroica de coloração cinza esverdeado, fanerítica média. Fonte: Eduardo M. Grissolia (2018).



- MC-132–GO

O furo MC-132-GO apresenta nos primeiros metros, solo vermelho escuro, argiloso, composto por restos vegetais, concreções ferruginosas e fragmentos de calcedônia, vide figura 29. A partir de 2 metros de profundidade, são registrados também blocos de rocha intemperizada, os quais se tornam cada vez mais frequentes com o aumento da profundidade. Estas características avançam até 10 metros de profundidade, onde a litologia passa a ser dominada por uma rocha de tonalidade rosada com níveis esverdeados, extremamente intemperizada e argilosa, na qual não é possível identificar estruturas pretéritas da rocha. A partir de 25,50 metros a rocha passa a apresentar cor marrom esbranquiçada. Zonas escuras com concentrações de óxidos são bastante frequentes. Nesta zona, os resultados obtidos com XRF portátil revelam uma diminuição dos teores de Fe e Al em relação aos primeiros metros do furo e, em contrapartida, um leve aumento dos teores de Ni e Co. Na profundidade de 36 metros, a rocha intemperizada passa a apresentar tonalidades esverdeadas com algumas intercalações de porções argilosas de coloração marrom. Há uma grande diminuição do teor de Al e um leve aumento do teor de Ni. Aos 47,50 metros de profundidade, é possível identificar uma rocha semi-intemperizada, classificada como gabro, de coloração cinza esverdeada, textura fanerítica média, com fenocristais de plagioclásio e k-feldspato alterados compondo aproximadamente 90% da matriz da rocha. A composição modal aproximada é formada por 90% plagioclásio, 5% óxidos 2% k-feldspato, 2% quartzo e 1% de minerais máficos.

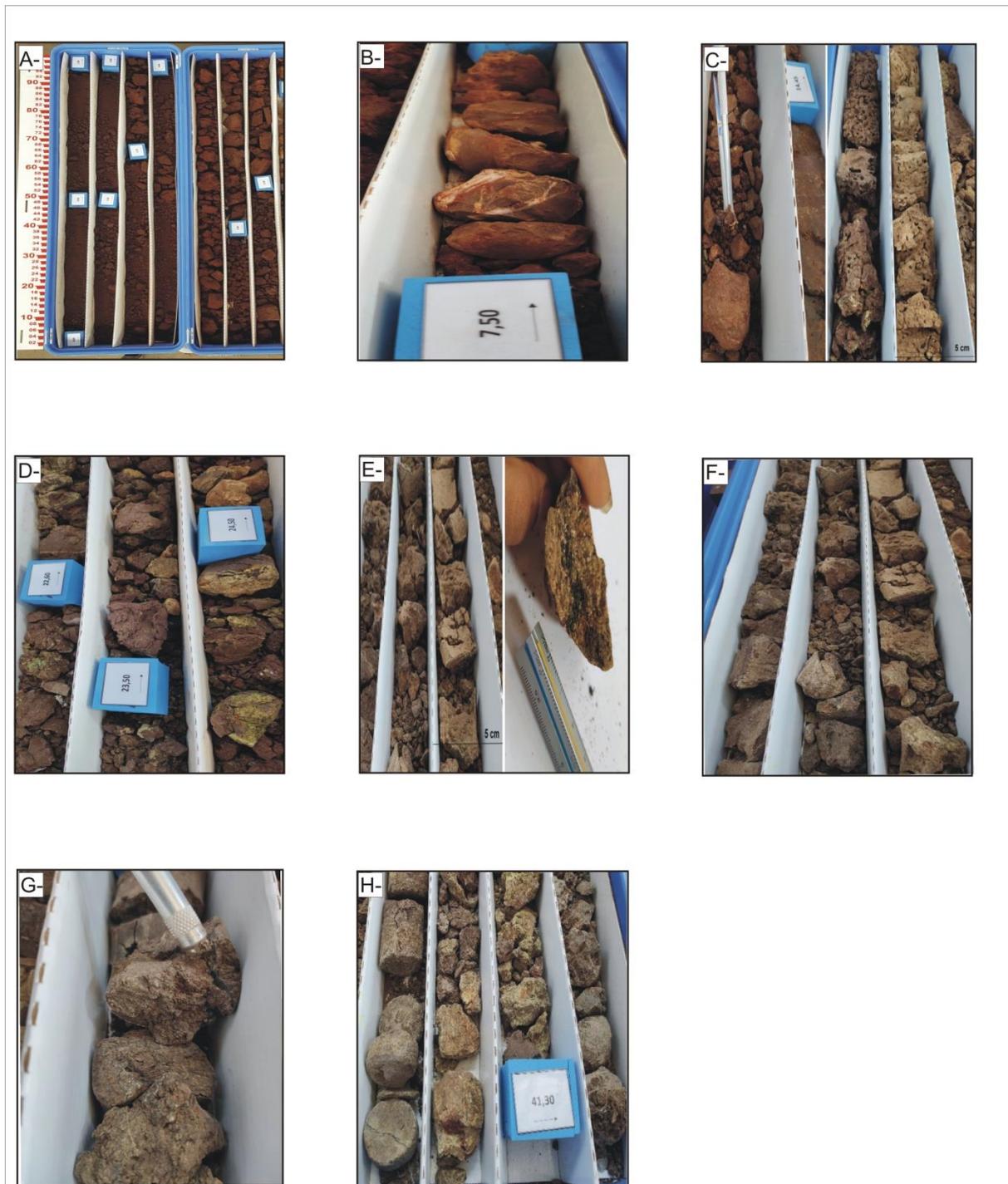
Figura 29 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-132-GO. Fonte: Da autora (2020).



- MC-112-GO

No furo MC-112-GO, o solo laterítico destaca-se pelo tom avermelhado e sua composição essencialmente argilosa, que nos metros iniciais também apresentou restos vegetais e concreções ferruginosas, compondo o perfil até 13,20 metros. Em seguida, apresenta argila com alternância de coloração, variando de alaranjado a amarronzado, contendo impregnações de óxidos, possivelmente asbolano, além de apresentar aspecto poroso, produzido por atividade de insetos bioconstrutores. Desde o topo, se observa diminuição gradual nos teores de Fe e um aumento considerável nos teores de Ni e Co, com o Ni atingindo seu valor mais alto, de 1,46%, entre 13,20 e 21,25 metros. A partir de 28,45 metros ocorre rocha muito intemperizada, bastante argilosa, com tonalidade amarelada. São observadas concentrações de óxidos, principalmente nas fraturas e zonas com presença de vermiculita produzindo coloração esverdeada. Exibe também argila de cor branca, oriunda da provável alteração dos plagioclásios. Venulações de sílica amorfa e quartzo são comuns. Apresenta forte magnetismo ao longo de todo furo. Os teores de Ni e Co permanecem altos nesta zona, acompanhados por um leve aumento de Al e Mg. Em 36,25 metros há uma diminuição do grau de intemperismo, permitindo uma melhor observação da rocha parental, a qual pode ser classificada como um gabro com forte alteração hidrotermal indicados pelo talco e carbonato, composto também por máficos e óxidos resistentes ao alto grau de intemperismo submetido. Há acentuada diminuição do teor de Ni, porém o teor de Co permanece na faixa de 0,10%, como mostra a figura 30.

Figura 30 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-112-GO. Fonte: Da autora (2020).

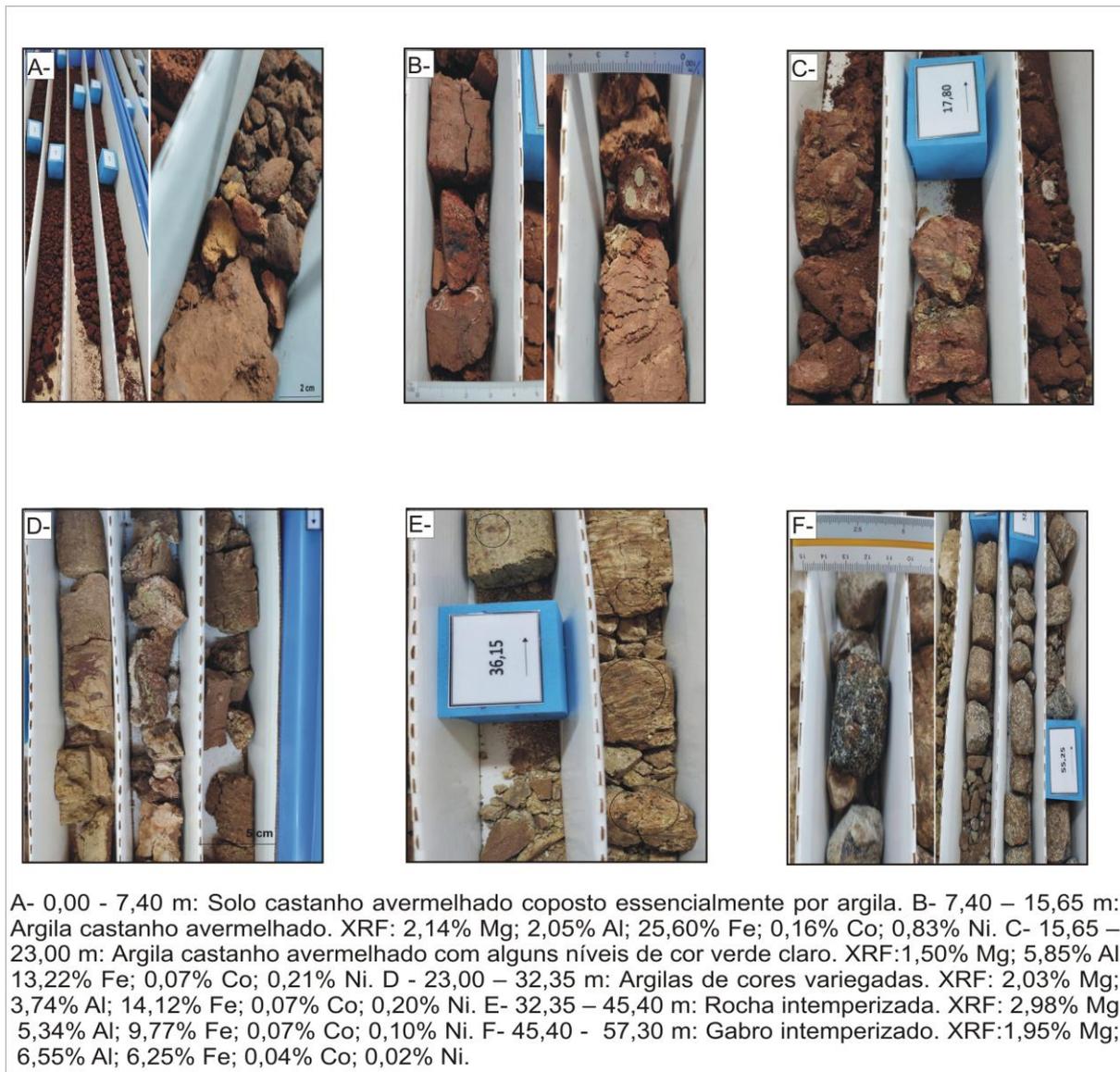


A- 0,00 – 7,50m: Solo e duricrosta laterítica. Fortemente magnético. XRF: 6,67% Al; 24,80% Fe; 0,09 % Co; 0,06% Ni. B- 7,50 – 13,20 m: Argila avermelhada. XRF: 2,48% Mg; 2,32% Al; 22,49% Fe; 0,13 % Co; 0,59% Ni. C- 13,20 – 21,25 m: Argila com alternância de coloração. XRF: 1,82% Mg; 3,40% Al 10,23% Fe; 0,11% Co; 1,46% Ni. D- 21,25 – 25,00 m: Argila marrom com vermiculita. XRF: 2,81% Mg 1,70% Al; 23,31% Fe; 0,16% Co; 0,54% Ni. E- 25,00 – 28,45 m: Rocha intemperizada. XRF: 1,46% Mg; 3,11% Al; 14,95% Fe; 0,12% Co; 0,63% Ni. F- 28,45 – 30,85 m: Rocha intemperizada com vermiculita. XRF: 4,11% Mg; 5,19% Al; 12,84% Fe; 0,09% Co; 1,20% Ni. G- 30,85 – 36,25 m: Rocha intemperizada fortemente magnética. XRF: 2,07% Mg; 1,49% Al; 21,15% Fe; 0,13% Co; 0,96% Ni. H- 36,25 – 54,90 m: Gabro intemperizado. XRF: 5,27% Mg; 1,26% Al; 18,13% Fe; 0,11% Co; 0,31% Ni.

- MC-100-GO

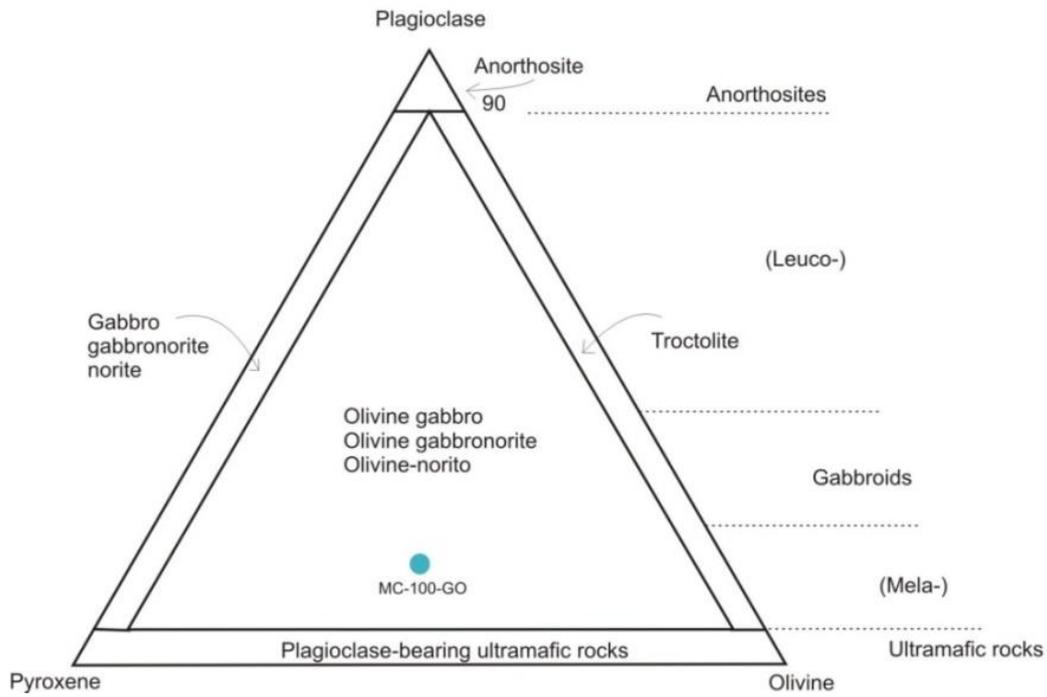
O furo MC-100-GO é composto, da superfície até 7,40 metros, por solo argiloso castanho avermelhado, contendo restos vegetais, concreções ferruginosas e presença de limonita. À medida que se avança em profundidade, o material torna-se mais argiloso e coeso, apresentando coloração castanha avermelhada intercalada com níveis escuros e níveis verdes claros, vide figura 31. Manchas brancas também são observadas, além da presença de óxidos escuros milimétricos, possivelmente asbolano. Teores elevados de Co, de até 0,16%, foram obtidos neste intervalo. Esta zona persiste até 23 metros de profundidade, onde a argila torna-se variegada, apresentando variação de coloração entre marrom, verde-claro e branco. Minerais micáceos de coloração verde clara também são observados. A partir de 32,35 metros, é possível identificar a rocha fortemente intemperizada, de cor cinza clara, com manchas esverdeadas e altamente magnéticas. Apresenta argila branca e impregnações de asbolano. Na profundidade de 45,40 metros o gabro intemperizado é observado na cor cinza claro, com textura fanerítica média a grossa. Possui a seguinte composição mineralógica aproximada: 80% de feldspato, 10% de piroxênio, 7% de magnetita e 3% de sílica.

Figura 31 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-100-GO. Fonte: Da autora (2020).

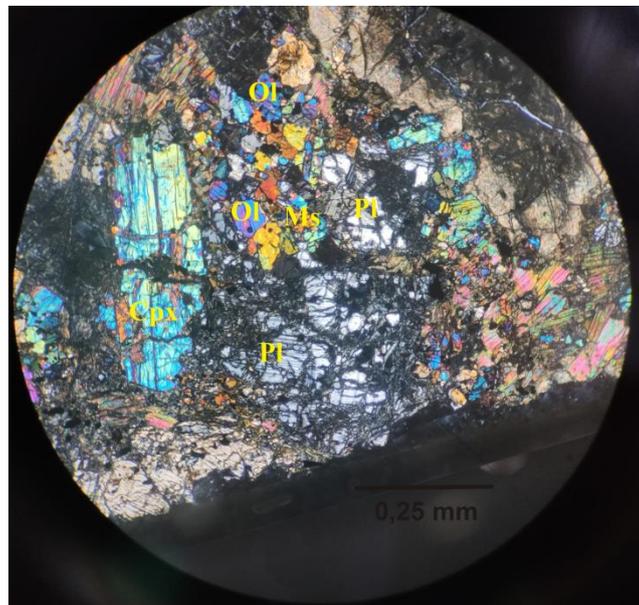


Ao microscópio, a rocha fresca do furo MC-100-GO apresentou a seguinte composição modal: 25% de olivina, 20% de clinopiroxênio, provável augita, 15% de magnetita, 12% de muscovita, 10% ortopiroxênio, 10% de plagioclásio, 8% de biotita. Com essa estimativa, foi possível classificar a rocha de acordo com o diagrama de rochas plutônicas máficas e ultramáficas de Streckeisen (1976 *apud* LE MAITRE, 2002, p. 25) como olivina-gabro (figura 32). Os cristais de plagioclásio são anédricos e geminados, de acordo com a lei da albita (Fotomicrografia 8). A muscovita apresenta-se deformada, mas de fácil identificação através da extinção olho de pássaro (Fotomicrografia 9).

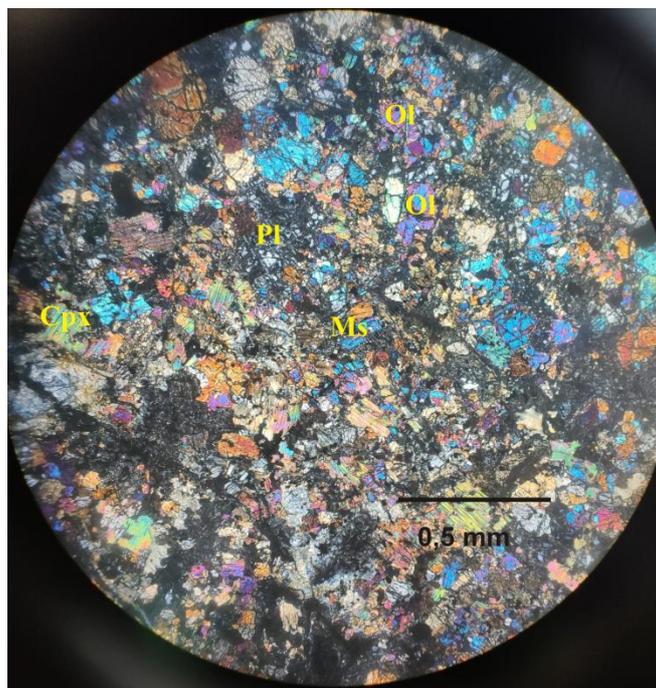
Figura 32 - Classificação modal de rochas gabróicas baseada na proporção de plagioclásio, piroxênio e olivina de acordo com Streckeisen (1976 *apud* Le Maitre, 2002, p. 25).



Fotomicrografia 8 - Cristais de plagioclásio (Pl) anédricos, bastante fraturados e geminados segundo a lei albita. Fonte: Da autora (2020).



Fotomicrografia 9 - Muscovita (Ms) no centro dos nicóis encontra-se deformada mas de possível identificação devido principalmente a extinção olho de pássaro. Fonte: Da autora (2020).



d) Zona sienito-nefelínica

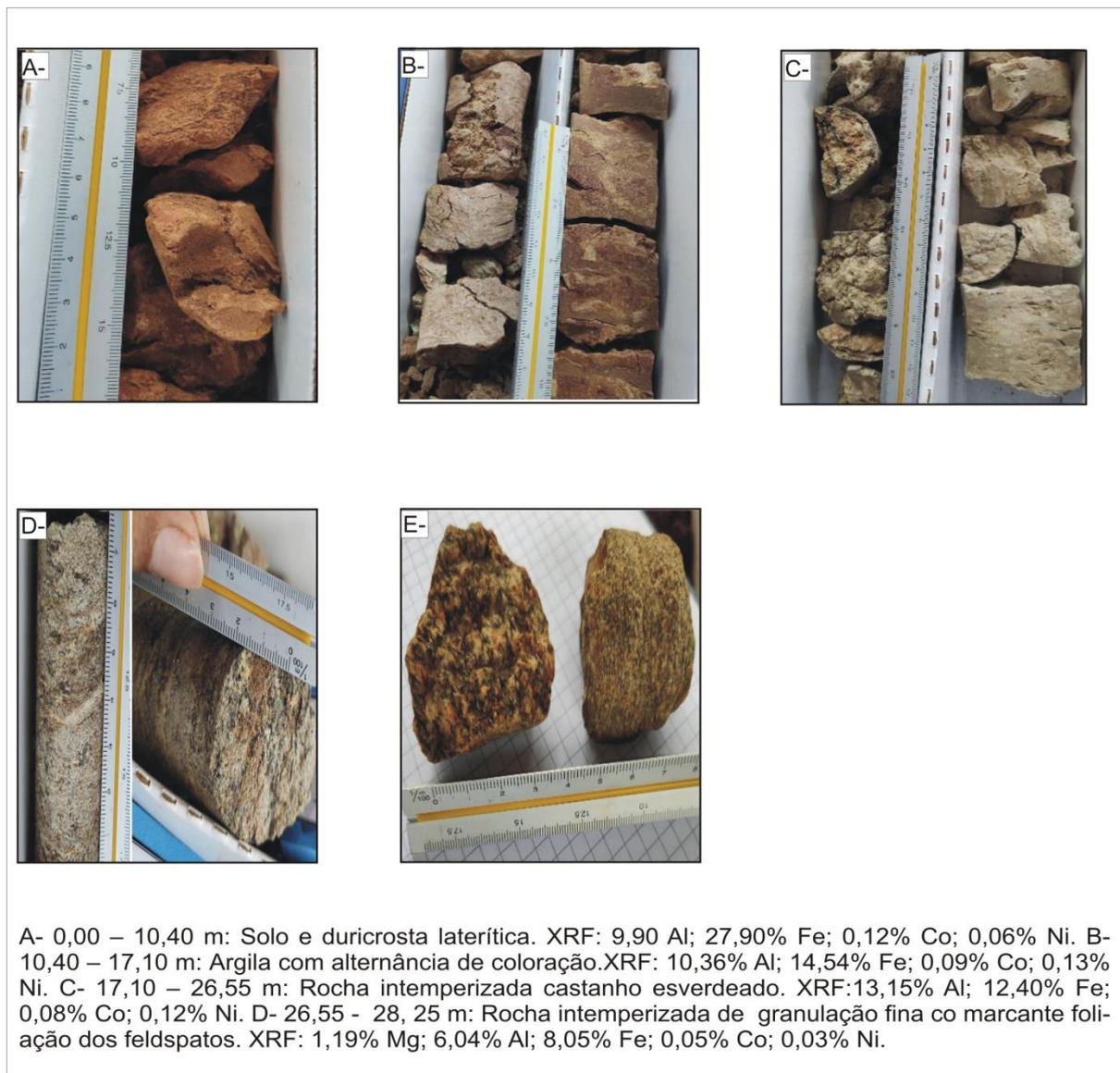
A zona sienito-nefelínica representada por diversos blocos de rocha fraturada (Foto 10) apresentam alto grau de intemperismo, dificilmente se observa afloramentos de rocha fresca. Esta característica é confirmada nos testemunhos de sondagem (Furo MC-108-GO), onde se constata a persistência do elevado grau de intemperismo mesmo em profundidade.

- MC-108-GO

O furo MC-108-GO é composto da superfície até 10,40 metros por solo laterítico marrom, por vezes vermelho escuro, bastante argiloso com blocos de rocha silicificada, passando para argila de coloração castanho esverdeada a castanho alaranjado e impregnações de óxidos. Entre 17,10 e 28,25 metros é observado o saprólito de cor cinza esverdeada com granulação mais fina, cada vez menos argiloso em direção a base do intervalo. Níveis marrons intercalados com níveis mais claros também são presentes. Representa o sienito de coloração rosada, semi-intemperizado, com granulação média e cristais milimétricos, no qual são visíveis a partir de 28,25 a 32,87 metros (profundidade total do furo). Sendo que em 28,25 metros a textura torna-se ligeiramente mais fina e foliada, vide figura 33. A associação mineralógica constitui 65% de K-feldspato, 17% de máficos, 15% de plagioclásio, 3% de quartzo. Em direção ao topo, no saprólito a mineralogia anterior permanece, acrescido de

óxidos disseminados, biotita e muscovita/sericita. Apresenta vênulas de quartzo cortando toda a rocha.

Figura 33 - Descrição geológica e resultados de XRF portátil para o furo MC-108-GO. Fonte: Da autora (2020).



Todo o complexo intrusivo é continuamente cortado por diques de rochas básicas a alcalinas, com poucos centímetros de espessura. Diques de diabásio foram descritos nos furos de sonda MC-53-GO e MC-70-GO. A coloração da rocha é cinza escuro, granulação fina e isotrópica.

III) TERCIÁRIO-QUATERNÁRIO

a) Cobertura laterítica

Os lateritos apresentam coloração vermelha intensa, de aspecto terroso, contendo restos vegetais, além de alguns fragmentos de silixito, dunito silicificado e arenito. A

granulometria varia entre areia, silte e argila, dependendo do material original. Hábito botrioidal de goethita se faz presente, assim como, o aspecto em rede, preenchido por calcedônia (Foto 20). Além disso, foi verificada alta susceptibilidade magnética, através do equipamento KT- ~ 10 S/C da Terraplusinc, o que confirma o grande conteúdo de Fe do material.

Foto 20 - Características dos lateritos encontrados: A) Hábito botrioidal, B) Aspecto em rede composto de calcedônia, C) Medição da susceptibilidade magnética e condutividade elétrica por meio do equipamento KT - 10 S/C da Terraplusinc. Fonte: Eduardo M. Grissolia (2018).



6. DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISES QUÍMICAS

Para esse trabalho foram estudados os dados químicos obtidos nas seguintes litologias apresentadas: dunito serpentinizado, no furo MC-42-GO (Figura 34); serpentinitos sob os furos MC-81-GO (Figura 35) e MC-51-GO (Figura 36); peridotito-harzburgito (Figura 37) representado no MC-46-GO e olivina-gabro no furo MC-100-GO (Figura 38). O quartzito e o sienito por apresentarem baixos teores de níquel não foram analisados. As análises químicas médias e os intervalos de variação foram coerentes com os apresentados por Chaban *et al.*, (1975). Na tabela 3, são apresentados os dados de análises químicas dos diferentes intervalos dos perfis de alteração intempérica.

Tabela 3 - Resultado das análises químicas para rocha total e níquel laterítico realizadas para os furos selecionados.

BHID	(m)	Lito Parental	Ni	Co	MnO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Analito Unidade
			%	ppm	%	%	%	%	%	%	
MC-42-GO	3,50	Dunito	0,00005	0,1	0,01	0,1	0,1	0,01	0,01	0,1	MDL
	9,30		0,3545	735,1	1	1,13	19,5	55	4,08	10,9	
	10,00		0,90681	409	0,66	4,49	29,6	46,3	2,5	3,65	
	14,20		1,33	408,5	0,86	6,08	39,5	35,4	1,87	3,75	
	17,30		1,4	236,5	0,48	6,96	43,5	25,7	1,03	7,34	
	20,50		0,62658	260	0,47	7,85	43	30,6	1,43	3,62	
	22,90		0,46081	258,3	0,49	14,4	36,4	31	1,52	3,53	
	27,30		0,34146	251,9	0,3	23,1	41,6	19,6	1,08	1,85	
	30,00		0,20935	148,1	0,22	21,3	53,4	14,7	0,76	0,88	
			0,15845	117,9	0,14	26,2	46,5	12,7	0,64	1,41	
MC-81-GO	2,00	Serpentinito	0,38452	565,1	0,82	1,11	22,9	50,5	3,97	10,9	
	10,00		0,79729	641,3	1,01	4,78	15,6	59,6	4,22	4,04	
	18,90		1,47	152,9	0,21	32,2	38,1	14,5	0,85	0,43	
	24,83		0,18467	112,1	0,16	36,3	38,3	11,2	0,69	1,24	
MC-51-GO	1,00	Serpentinito	0,39455	830,2	1,03	0,9	19,9	53,8	3,65	11,3	
	3,30		0,93128	380,7	1,04	4,67	48,1	10,1	0,25	20,2	
	6,20		0,5403	187,9	0,31	3,65	44,1	21,4	0,34	15,4	
	8,05		0,62975	181,3	0,39	4,66	45,9	18,4	0,17	15,7	
	9,85		0,67341	535,3	0,68	4,66	43,1	28,7	1,03	8,28	
	11,00		0,74929	797,7	0,81	4,13	42,1	39,5	1,83	2,84	
	18,00		0,71162	284,8	0,48	5,94	45,8	28,7	1,33	5,37	
	22,44		0,38892	294,7	0,5	12,4	39,2	32,6	1,62	2,04	
MC-46-GO	2,40	Peridotito-Harzburgito	0,17934	141,1	0,23	31,3	40,1	15,2	0,76	0,44	
	9,00		0,27002	161,3	0,16	0,53	56,7	29,7	1,41	4,71	
	12,00		0,46827	269,4	0,39	5,74	47,7	29,9	0,88	3,66	
	18,80		0,62932	104,5	0,31	8,41	49,4	14,6	0,34	11,7	
	21,30		0,2476	236,7	0,49	7,1	47,9	28,3	0,75	3,25	
	30,10		0,19288	221,1	0,45	7,73	47,3	28,6	0,62	2,36	
	34,70		0,1389	127,2	0,31	12,7	48,5	17,4	0,64	4,64	
	47,21		0,1695	183,3	0,35	11,4	51	21,9	0,54	1,69	
	53,85		0,08481	104,8	0,22	24,9	42,2	13,8	0,32	3,62	
			0,11222	117,8	0,23	30,2	39,7	15,9	0,33	1,44	
MC-100-GO	4,15	Olivina-gabro	0,20571	724,3	0,81	0,35	41,1	37,7	2,17	9,36	
	13,45		0,98293	764,7	0,71	4,07	37,3	31,9	1,36	8,63	
	17,75		0,46217	364,2	0,52	3,68	49,9	22,5	0,98	10,2	
	25,00		0,21762	136,9	0,3	5,97	43	23,7	0,73	12,2	
	33,00		0,10899	108,1	0,31	6,01	45,3	18,6	0,68	14	
	51,10		0,04045	73,6	0,2	12,9	48,9	12,8	0,17	10,6	

De posse dos resultados químicos, foram construídos modelos buscando, a partir da integração com os dados litológicos, uma caracterização do comportamento e da mobilidade química, dos principais elementos e óxidos envolvidos na mineralização do depósito, ao longo do perfil laterítico.

Figura 34 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o dunito serpentinizado no furo MC-42-GO. Fonte: Da autora (2020).

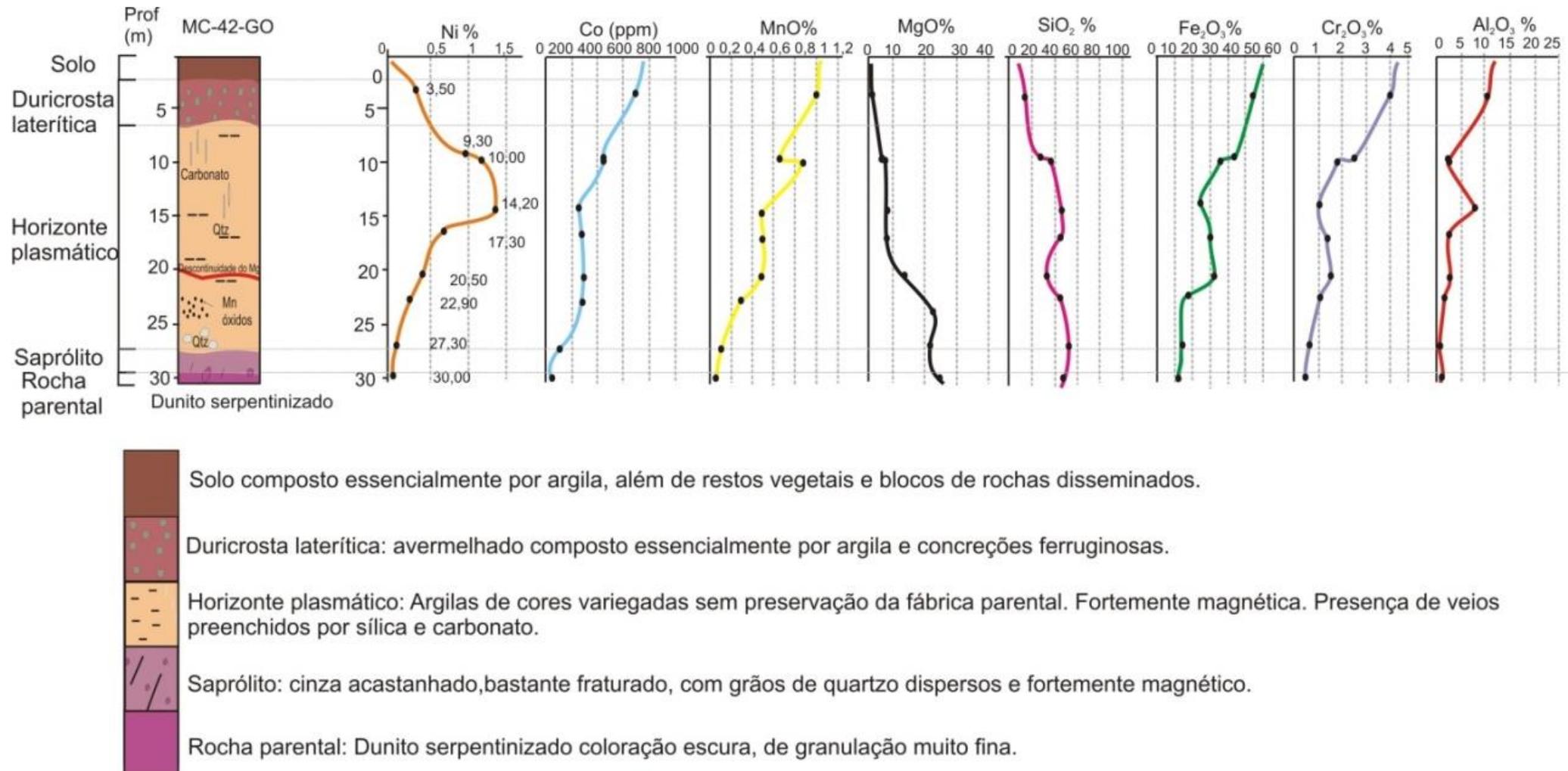


Figura 35 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o serpentinito no furo MC-81-GO. Fonte: Da autora (2020).

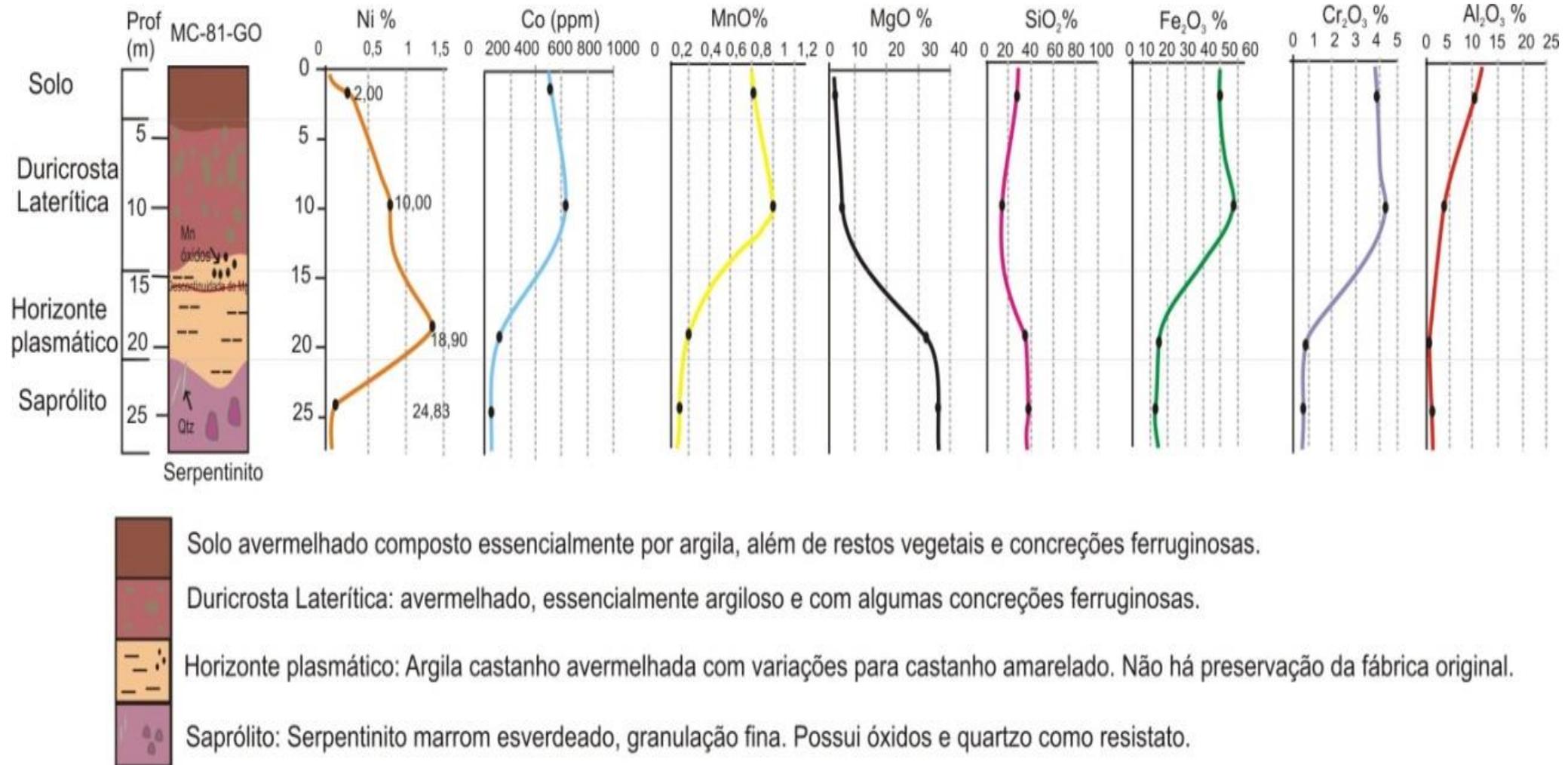


Figura 36 - Perfil laterítico desenvolvido sobre serpentinito no furo MC-51-GO. Fonte: Da autora (2020).

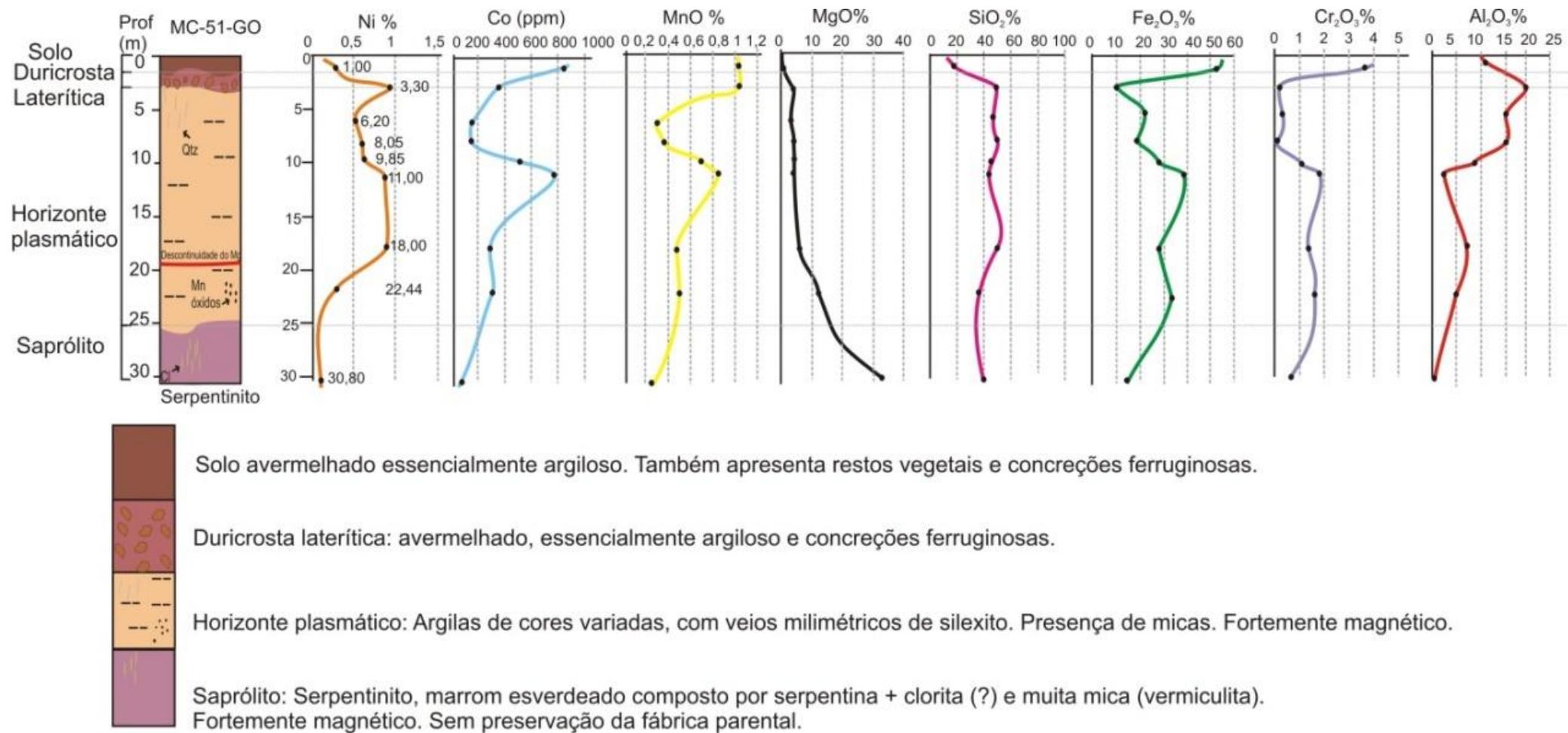


Figura 37 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o peridotito-harzburgito no furo MC-46-GO. Fonte: Da autora (2020).

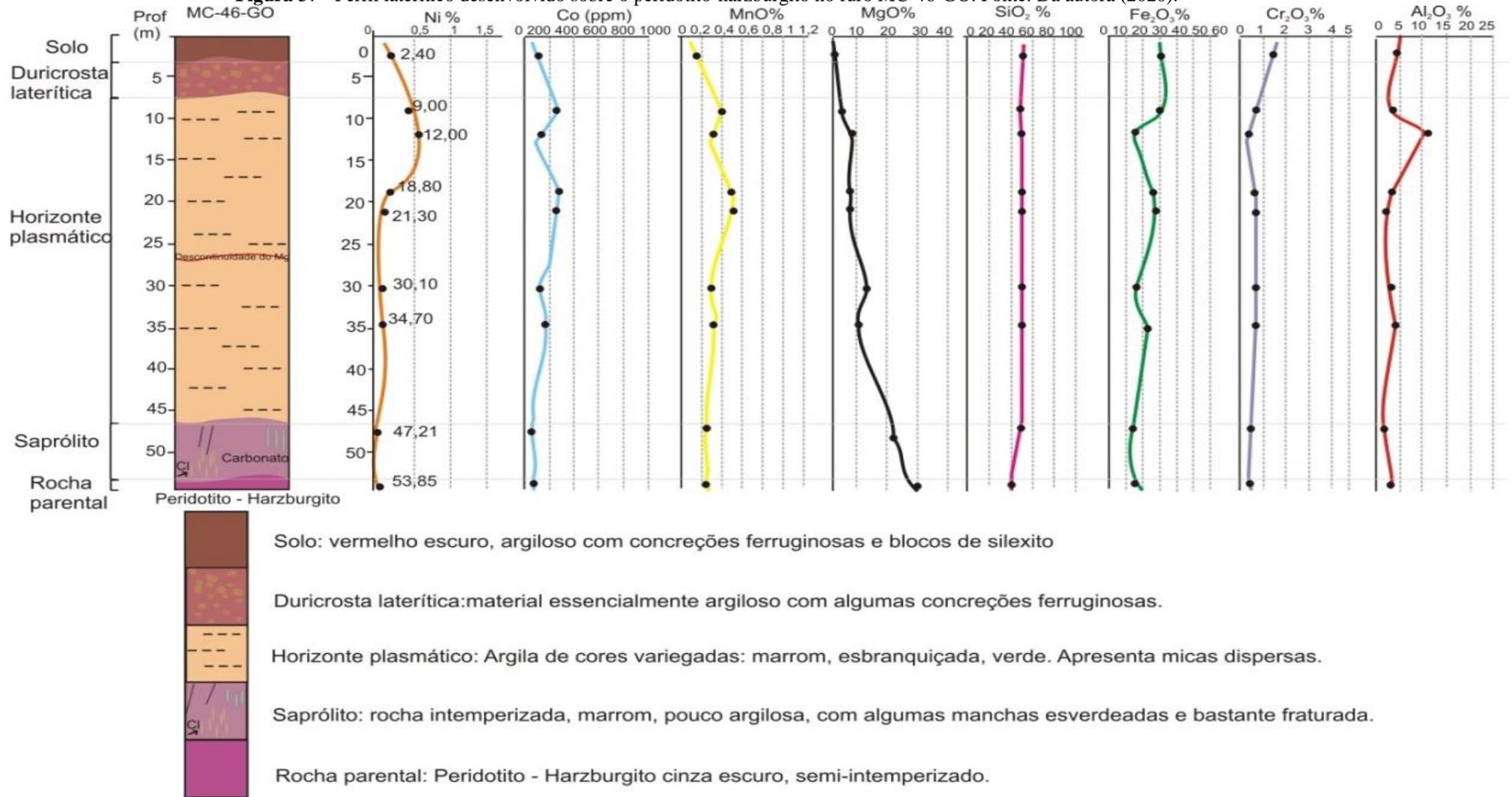
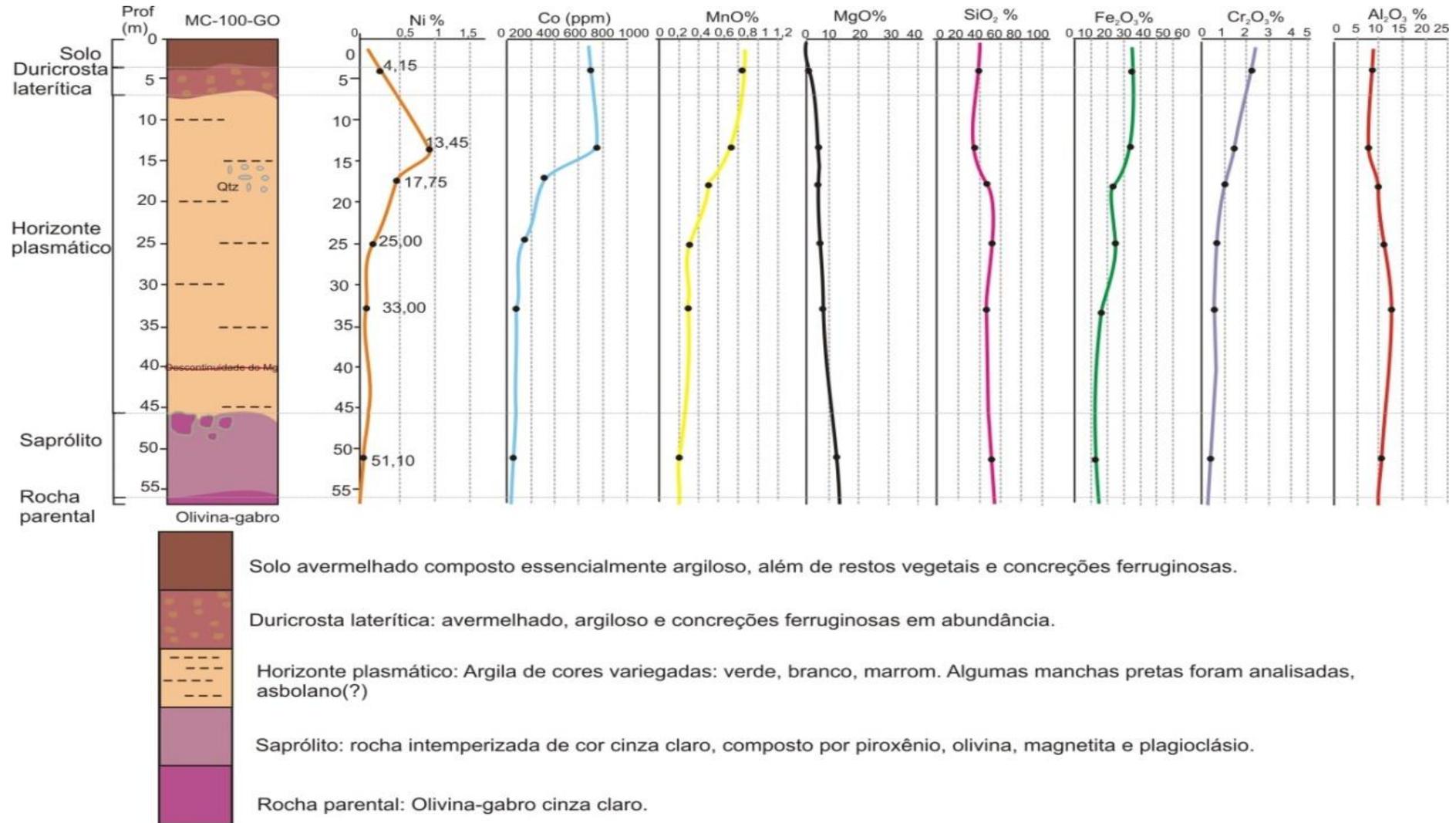


Figura 38 - Perfil laterítico desenvolvido sobre o olivina-gabro no furo MC-100-GO. Fonte: Da autora (2020).



6.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

As zonas dos perfis lateríticos analisados na área de estudo foram divididos de acordo com os horizontes estabelecidos por Butt e Cluzel (2013), descritos da base para o topo por: rocha-parental, saprólito, horizonte plasmático, duricrosta laterítica e solo. Os contatos definidos entre eles são nítidos e ocorrem de maneira irregular em profundidade. A base do saprólito foi alcançada nos furos: MC-42-GO (Figura 34), composto por dunito serpentizado e fraturado, MC-100-GO (Figura 38), correspondente à olivina-gabro, e MC-46-GO (Figura 37), formado por peridotito-harzburgito. Nestes furos foi possível uma observação de 2 a 3 metros da rocha parental semi-fresca. A espessura do saprólito identificada nos furos citados varia de 2,5 metros a 10,5 metros e do horizonte plasmático de 20 a 40 metros, com exceção do furo MC-81-GO (Figura 35), que apresenta um nível plasmático menos desenvolvido de saprólito, cerca de 6 metros de espessura, devido à baixa profundidade do furo, não sendo possível identificar a espessura real. Entretanto, a duricrosta laterítica desenvolvida no perfil do furo MC-81-GO apresenta 11 metros, o que difere dos demais, que possuem 2 a 5 metros de espessura. A zona citada pela literatura como saprólito ferruginoso não foi encontrada nos perfis investigados.

Válido ressaltar que o furo MC-81-GO apresentou as maiores concentrações de Ni, atingindo cerca de 1,47% no horizonte plasmático e suas singularidades diante dos outros furos podem ser a explicação para este fato. A duricrosta laterítica, mais desenvolvida, com seu nível silificado composto por calcedônia e opala, se comportou como um “tampão”, que auxiliou no isolamento da rocha parental, como bolsão. Assim, no novo ciclo de lateritização, possivelmente, houve a geração de um perfil laterítico abaixo desse nível silificado, de menor espessura, também dada a profundidade do furo, com os maiores valores do elemento, condicente com a história evolutiva apresentada por Oliveira (1980).

A zona do saprólito exhibe aspecto maciço, sua coloração varia de cinza acastanhado a marrom esverdeado, dependendo da litologia sob a qual foi desenvolvida. Além disso, apresenta intensas venulações carbonáticas milimétricas, por vezes, centímetricas. Em geral, nas observações este intervalo não há preservação da trama parental, exibindo uma serpentinização e cloritização.

A coloração das argilas apresentadas no horizonte plasmático varia do marrom ao verde acastanhado e, da base para o topo, o material torna-se cada vez mais friável. Diferente da zona do saprólito, não há quaisquer preservações de texturas reliquiares.

Por fim, a duricrosta ferruginosa, avermelhada, muito friável, é composta essencialmente por argila, englobando nódulos e concreções ferruginosas.

6.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A mineralogia do perfil laterítico de Morro do Engenho assemelha-se ao de Murrin Murin, na Austrália, apresentada por Gaudin *et al.* (2005). Da base para o topo, exhibe uma zona de saprólito, uma zona de horizonte plasmático com uma espessura de 20 a 40 metros, e uma duricrosta laterítica de 2 a 5 metros. As maiores concentrações de níquel ocorrem nos dunitos, na zona do horizonte plasmático, atingindo teores de 1,47%. Os perfis lateríticos desenvolvidos sobre os demais litotipos presentes no depósito, apresentam baixos valores de níquel, variando de 0,1% a 0,2% em geral, sendo assim considerados estéreis. Similarmente ao que ocorre no depósito de Vermelhos, na Serra do Carajás descrito por Oliveira e Silva (1995).

Dados macroscópicos e petrográficos, acompanhados da literatura, foram usados para caracterizar a mineralogia do perfil de intemperismo. O dunito é composto essencialmente por olivina serpentinizada em suas bordas e o carbonato aparece em vênulas. O harzburgito, além dos cristais de olivina, que se encontram corroídos e alterados, caracterizados por núcleos ovulares, apresenta também o ortopiroxênio com sinais de alteração, e em menores teores o talco e minerais opacos como magnetita. No olivina-gabro o predomínio é do clinopiroxênio, seguido pela olivina.

O saprólito ainda apresenta coloração amarelada nos dunitos e é composto sumariamente por serpentina e pseudomorfos de olivina, que por vezes, mostram-se talcificadas. No harzburgito, a olivina encontra-se ausente, restando apenas minerais opacos e poucos cristais de piroxênio. A argila, possivelmente esmectita, também é encontrada nesse intervalo, além de magnetita. Carbonato é observado em microvênulas. O talco desenvolve-se no harzburgito e no olivina-gabro, também em fissuras, assim como a sílica. Bem menos frequente, a clorita é encontrada localmente nos furos MC-51-GO (Figura 36) e MC-46-GO (Figura 37), na forma de aglomerados irregulares cortando a rocha.

A zona do horizonte plasmático consiste de argila, possivelmente esmectita. Composição semelhante à descrita por Colin *et al.* (1990) no perfil de Angiquinho, Niquelândia (GO). São encontradas nas cores verde-escuro e marrom amarelado e apresentam aspecto poroso. A serpentina desaparece quase totalmente neste intervalo, observada apenas de forma pontual. Por outro lado, a magnetita é facilmente observada nas lâminas petrográficas descritas.

A duricrosta ferruginosa representa o estágio final da alteração laterítica, na qual já não é mais possível a identificação dos silicatos. É pouco compacta e de coloração marrom avermelhado, composta por óxidos e hidróxidos de ferro, além de pequenas quantidades de argila e fragmentos de quartzo. Oliveira (1980) descreve a presença da hematita na região de Santa Fé, um depósito análogo que ocorre próximo a Morro do Engenho. As amostras neste intervalo apresentam alta porosidade e fraturamento, bem como nódulos e concreções de hematita e goethita.

6.4 COMPORTAMENTO E MOBILIDADE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

De acordo com o estudo dos perfis e resultados das análises químicas, verifica-se uma conformidade com os perfis lateríticos típicos descritos por Butt e Cluzel (2013), o que permite associar o depósito de Morro do Engenho ao tipo silicato de argila, no qual as maiores concentrações de níquel ocorrem na zona de horizonte plasmático, ou seja, na fase silicática. Desta forma, pode-se correlacionar as características do depósito de Morro do Engenho a depósitos como San Felipe, em Cuba (Rodríguez *et al.*, 2016), Murrin Murrin, na Austrália (Gaudin *et al.*, 2005) e Angiquinho, em Niquelândia, no estado de Goiás (Colin *et al.*, 1990) de mesma classificação. Tais depósitos são característicos de climas áridos e semiáridos, a exemplo da área estudada. As divergências em relação ao depósito de Carajás se dão em função deste exibir dois tipos de fases minerais portadoras de níquel, uma fase oxidada e outra silicática (Oliveira e Silva, 1995). Na área investigada, também há uma concentração de Ni na zona oxidada, mas no horizonte plasmático é muito mais expressivo.

Comumente ao que ocorre nesse tipo de depósito, os teores de MgO e SiO₂ diminuem da base para o topo do perfil, enquanto que os valores de Fe₂O₃ aumentam significativamente, modelo similar ao de Carajás (PA). Alguns picos anômalos de SiO₂, encontrados nos níveis superficiais, coincidem com a presença dos blocos de quartzo e sílica amorfa, como descritos. A queda brusca de MgO é claramente descrita em todos os perfis apresentados, sugerindo a alta lixiviação dos minerais magnesianos ao topo do perfil, causando aumento da porosidade e diminuição da densidade (Elias, 2002, p. 6). O SiO₂ apresenta mobilidade baixa, denotando

um regime hídrico pouco eficaz para a dissolução do quartzo, seja pelo pouco tempo de residência da água no solo, seja por um possível caráter levemente ácido da solução aquosa. Os perfis de MgO e SiO₂ indicam que uma maior lixiviação ocorreu nas unidades serpentinizadas, provavelmente devido a maior permeabilidade dessa unidade. Válido ressaltar, que o pH mais básico é indicado pela presença das microvênulas de carbonato descritas.

A presença da descontinuidade de MgO posicionada abaixo das maiores concentrações de níquel, é uma singularidade do depósito de Morro do Engenho, visto que o modelo de Butt e Cluzel (2013) ocorre acima da referida descontinuidade. Uma possível explicação para tal diferença seria a mineralogia da rocha parental, a qual é enriquecida em magnetita e olivina serpentizada, que sugere um favorecimento à acumulação de altos teores de níquel. Assim, os minerais ferromagnesianos teriam sido precocemente lixiviados, favorecendo o enriquecimento de níquel na base do perfil. Mudanças no padrão hídrico atual com aumento do escoamento superficial (*run-off*), juntamente com o padrão de fraturamento da rocha, este de caráter heterogêneo, pode ter influenciado na lixiviação de elementos com o Si, Mg e Ni, a exemplo que ocorreu nos depósitos de Sante Fé (Oliveira, 1980).

O Co e MnO seguem padrões muito similares em todos os perfis analisados, sendo classificados como elementos traços na trama parental, composta por olivina e piroxênio. O Cr₂O₃ e Al₂O₃ concentram-se no topo dos perfis, corroborando com dados macroscópicos, nos quais foram verificados cristais de cromita, além de micas como a biotita e muscovita. Além disso, em suma maioria, os altos valores de Al₂O₃ são coincidentes aos de Ni, o que reforça o modelo do tipo silicato de argila.

6.5 ANÁLISE QUÍMICA E AS DIFERENTES LITOLOGIAS

De acordo com Elias (2002), a composição mineralógica do protólito influencia a vulnerabilidade ao intemperismo e, conseqüentemente, os elementos disponíveis para lixiviação e concentração. A lixiviação dos constituintes móveis, os álcalis e alcalino-terrosos, promovem a repartição da olivina e serpentina, retirando o Mg, Ni, Mn e Co do sistema cristalino. Observando as descrições petrográficas, o dunito e o serpentinito são compostos essencialmente por essa mineralogia parental. Desta forma, analisando os perfis estudados, é possível deduzir o motivo pela qual esses litotipos apresentam os maiores teores de Ni, de até 1,4%.

Ainda de acordo com Elias (2002), a olivina e a serpentina são altamente suscetíveis ao intemperismo químico, e em menores proporções, o piroxênio, a clorita e a cromita. A serpentinização da olivina auxilia no desenvolvimento das lateritas niquelíferas, podendo assim, enriquecer residualmente em Ni durante a formação do minério supergênico, originando a estrutura em malha das serpentinas visualizada ao microscópio em todas as lâminas do dunito e serpentinito. Essa textura de serpentinização gera porosidade secundária que permite o processo de hidrólise da mineralogia principal altamente instável (Marsh *et al.*, 2013, p. 21). Após essa partição, houve a formação dos minerais secundários e a geração dos óxidos de Fe e Al, as argilas e a adsorção do Ni.

A alta instabilidade dessas rochas ultramáficas, devido a sua mineralogia parental, promoveu curvas de Ni, Co, Mn, MgO e SiO₂ acentuadas, diferentemente do harzburgito e do olivina-gabro que apresentam padrões suavizados. Para os harzburgitos e olivina-gabros sugere-se que o aumento da presença da sílica na composição original, promoveu uma maior estabilidade dessas rochas, gerando um resíduo com elementos insolúveis e com menores proporções de Ni, produzindo concentrações não econômicas, em média 0,2 a 0,4% (Marsh *et al.*, 2013, p. 18; Elias, 2002, p. 15).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração dos dados petrográficos e geoquímicos do depósito de Morro do Engenho com os dados geológicos, geocronológicos e outros produtos levantados por meio da bibliografia disponível, permitiu avanço no conhecimento sobre a mineralização de níquel da região, proporcionando uma melhor individualização das zonas que compõem o perfil laterítico.

Além disso, foi possível analisar a mobilidade geoquímica dos principais elementos e óxidos relacionados à rocha parental máfica-ultramáfica, e classificar o tipo de depósito como silicato de argila, no qual as maiores concentrações do níquel ocorrem na zona de horizonte plasmático. Contudo, uma maior precisão na caracterização dos limites estabelecidos entre rocha sã e saprólito, pode ser alcançada com estudos de detalhe.

O tratamento interpretativo dos dados permitiu encaixar a história da gênese do depósito de acordo com a literatura proposta por Barbour (1976) e Oliveira (1980), no qual verifica-se que após a intrusão ultramáfica a região foi submetida a um processo de aplainamento, comprovado pelos morros testemunhos de dunito. Durante essa etapa, seguiu-se a fase de lateritização e assim o intemperismo e erosão da crosta produzida.

O depósito de Morro do Engenho consiste em um domo zonado com núcleo dunítico serpentizado, circundado pelo harzburgito e pela olivina gabro, encaixado no arenito da Formação Furnas, que localmente apresentam o quartzo recristalizado gerado no metamorfismo de contato. O estudo indicou que o processo de serpentização pode ser o principal causador da mineralização de níquel. Trata-se de uma caracterização preliminar que cabe ser refinada com estudos mais detalhados para investigar não somente esse fenômeno, como também a geração das duas fases de magnetita, vistas em lâminas, em porcentagens significativas. Sugere-se que tais minerais poderiam também estar associados ao depósito, como mineral portador do minério. Além disso, a formação do talco e do carbonato em veios, indicam atividades de soluções hidrotermais que podem formar bolsões de níquel e devem ser avaliadas.

Os dados gerados permitiram inferir perfis de alteração representativos da área, sendo do topo para a base, composto por solo avermelhado, em geral argiloso, formado por restos vegetais e concreções ferruginosas; a duricrosta laterítica, com maior coesão do que a zona anterior, avermelhada e com fragmentos de rochas; o horizonte plasmático essencialmente

argiloso, onde se encontram as maiores concentrações do níquel, atingindo até 1,47%; o saprólito, no qual, ainda é possível observar algumas características da rocha original, as quais foram identificadas apenas nos furos MC-42-GO, o dunito, MC-46-GO, o harzburgito, e MC-100-GO, o olivina gabro.

A mobilidade geoquímica, investigada através das análises, comprovou o caráter cumulativo do Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Co e Al_2O_3 nas zonas superficiais, concordante com a presença dos nódulos ferruginosos, das argilas, além da biotita e muscovita. Além disso, o Co e MnO seguem padrões muito similares nos perfis analisados. O MgO solúvel, é lixiviado intensamente em direção ao topo do perfil.

As maiores concentrações de Ni foram encontradas no horizonte plasmático, principalmente, desenvolvidos sobre os dunitos, em razão de sua mineralogia parental, a qual permitiu concentrações superiores à das demais litologias. Propõe-se que altos teores do níquel esteja abrigado em argilas, possivelmente as esmectitas. Estas podem atuar como armadilha para o metal. Recomenda-se, um estudo futuro com difratometria de raios-x e geoquímica refinada para caracterizar essa fase portadora do minério.

Por fim, embora o objetivo não tenha sido a abordagem econômica e prospectiva para o cobalto, cabe mencionar que os dados apresentaram valores relevantes, tendo em vista o cenário atual de forte demanda pelo elemento e disponibilidade limitada. Assim, com a evolução dos dados levantados na petrografia e geoquímica, trabalhos futuros permitirão um melhor entendimento dos controles e condicionantes para a formação de depósitos de Ni laterítico na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEVA, G.J.J. **The Corlat Handbook**: guiderlines and background information for the description of laterite profiles for interdisciplinary use. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1993. 154 p.
- ALEVA, G.J.J. **Laterites**: concepts, geology, morphology and chemistry. Wageningen: ISRIC, 1994. 169 p.
- ALMEIDA, F.F.M. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Rio de Janeiro: dnpm, 1967. 36p. (Boletim DGM, 246).
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; NEVES, B.B. de B.; FUCK, R.A. Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande-PB. **Atas** [...] Campina Grande: SBG, 1977. p. 363-391.
- ALMEIDA, F.F.M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozoicas na região meridional da Plataforma Sul-Americana. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 13, n. 3, p.139-158, set. 1983.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.
- ALVES, F.M.; SILVA, A.B.; GRISSOLIA, E.M.; ABDALLAH, S.; BRITO, A.A.; WOSNIAK, R. Análise do comportamento da susceptibilidade magnética e condutividade elétrica no perfil de alteração rochoso do depósito niquelífero de Morro do Engenho, Goiás, Brasil. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 16., 2019, Rio de Janeiro-RJ. **Anais** [...] Rio de Janeiro: SGB/CPRM, 2019. 5 p.
- ASSINE, M.L.; SOARES, P.C.; MILANI, E.J. Sequências tectono-sedimentares mesopaleozoicas da bacia do Paraná, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-89, jun. 1994.
- ASSINE, M.L.; PERINOTTO, J.A.J.; ALVARENGA, C.J.S.; PETRI, S. Arquitetura estatigráfica, tratos deposicionais e paleogeografia da bacia do Paraná (Brasil) no neo-ordoviciano/ eo-siluriano. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 61-76, mar. 1998.
- BARBOSA, O. Quadro provisório das superfícies de erosão e aplainamentos no Brasil. **Notícia Geomorfológica**, São Paulo, n. 4, p. 31-33, 1959.
- BARBOUR, A.P. **Geologia do maciço ultramáfico de Santa Fé, Goiás**. 1976. 151f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.
- BARBOUR, A.P.; GIRARD, V.A.V.; KAWASHITA, K.; SOUZA, A.M.S. Geocronologia do Complexo Máfico-Ultramáfico Alcalino de Santa Fé, Goiás. **Boletim do Instituto de Geociências**, São Paulo, v.10, p.11-18, 1979.
- BIONDI, J.C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p. 383-406.

BIZZI, L.A.; VIDOTTI, R.M. Condicionamento do magmatismo Pós-Gondwana. *In*: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (org.) **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. p. 335-361.

BRAND, N.W.; BUTT, C.R.; ELIAS, M. Nickel laterites: classification and features. **AGSO Journal of Australian Geology e Geophysics**, Symonston ACT, v. 17, n. 4, p. 81-88, 1998.

BUTT, C.R.M.; CLUZEL, D. Nickel laterite ore deposits: weathered serpentinites. **Elements**, Quebec v. 9, p. 123-128, abr. 2013.

CHABAN, N.; SANTOS, J.F.; TAKAHASHI, A.T.; OLIVEIRA, J.A.; BERBERT, C.O.; TRIGUIS, J.A.; ARAUJO, A.G. **Projeto Morro do Engenho**: relatório único de pesquisa de níquel realizada nos municípios de Montes Claros de Goiás e Jussara, estado de Goiás. Goiânia: CPRM, 1975. 16 v.

CHOQUE FERNANDEZ, O.J. A garnierita da mina Onça-Puma, Carajás, Pará. **Boletim Do Museu de Geociências da Amazônia (Grupo de Pesquisa Geologia e Geoquímica Aplicada – GMGA)**, Belém, ano 5, n. 1, mar. 2018. Disponível em: <http://gmga.com.br/03-garnierita-da-mina-onca-puma-carajas-para/>. Acesso em: 29 out. 2020.

COLIN, F.; NAHON, D.; TRESCASES, J.J.; MELFI, A.J. Lateritic Weathering of Pyroxenites at Niquelandia, Goiás, Brazil: the supergene behavior of nickel. **Economic Geology**, Chicago, v. 85, n. 05, p.1010-1023, ago. 1990.

COSTA, M.L. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. **Exploration and Mining Geology**, v. 6, n. 1, p. 79-104, jan. 1997.

COSTA, M.L. Introdução ao intemperismo laterítico e lateritização. *In*: LICHT, O.A.B.; MELLO, C.S.B.; SILVA, C.R. **Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás**. Rio de Janeiro: SBGq: CPRM, 2007. p. 199-244.

COSTA, M.L.D.A. A importância da lateritização para a formação de depósitos minerais e suas perspectivas para os terrenos brasileiros. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE EXPLORAÇÃO MINERAL, 3., 2008, Minas Gerais. **Resumos** [...] Minas Gerais: UFP, 2008.

COSTA, M.L. O níquel no Brasil e seus depósitos lateríticos. *In*: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.C.; CORDANI, U.G. (org.) **Recursos Minerais no Brasil**: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. Cap. 01, p.124-132.

DECRÉE, S.; POURRET, O.; BAELE; JEAN-MARC. Rare Earth element fractionation in heterogenite (CoOOH): implication of cobalt oxidized ore in the Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo). **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 159, p. 290-301, dez. 2015.

DE MARTONNE, E. Problemas morfológicos do Brasil Tropical Atlântico. **Revista Brasileira de Geografia**, São Paulo. v. 5, n. 4, p. 532-550, jan./mar. 1943.

DUTRA, A.C.; MARANGONI, Y.R.; JUNQUEIRA-BROD, T.C. Investigation of the Goiás Alkaline Province, Central Brazil: Application of gravity and magnetic methods. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 33, n.1, p. 43-55, fev. 2012.

EGLINGTON, R.A. **The regolith glossary – surficial geology, soils and landscapes**. Canberra: Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration, 2001. 144p.

ELIAS, M. Nickel lateritic deposits – Geological overview, resources and exploitation. In: COOKE, D.; PONGRATZ, J. (ed.) **Giant Ore Deposits: characteristics, genesis and exploration**. Hobart: University of Tasmania, 2002. p. 205-220.

FONSECA, D.S. Cobalto. In: DNPM. **Sumário Mineral 2014**. Brasília, v. 34, 2005. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/sumarios/cobalto-2014/view>. Acesso em: 29 out. 2020.

FONTE BOA, T.M.R. Níquel e cobalto. In: PEDROSA-SOARES, A. C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. (org.) **Recursos Minerais de Minas Gerais online**. Belo Horizonte: CODEMGE, 2018. p. 1-24.

FREITAS, R.O. Relevos policíclicos na tectônica do escudo brasileiro. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, n. 7, p. 1-19. 1951.

GAUDIN, A.; DECARREAU, A.; NOACK, Y.; GRAUBY, S. Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentized peridotites at Murrin Murrin, Western Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, Sydney, v. 52, n. 2, p. 231-241, abr. 2005.

GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; LEONARDOS, O.H.; DICKINSON, A.P.; MITCHELL, J.G. The Late Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume: Evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. **Journal of Petrology**, Oxford, v. 36, n. 1, p. 189-229, fev. 1995.

IANHEZ, A.C.; PITTHAN, J.H.L.; SIMÕES, M.A.; DEUARCO, J.D.; TRINDADE, C.A.H.; LUZ, D.S.; FERNANDES, C.A.C.; TASSIARI, C.C.G.; SOUZA JR, J.J.; FREIRE, F.F.; OLIVEIRA, F.G.; SILVA, R.H.; BRONOW, C.N.; MOREIRA, H.L. Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SE.22 Goiânia**. Rio de Janeiro, 1983. 764 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 31).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 366p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 4).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 272p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 1).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **BC250 - base cartográfica contínua do Brasil - 1:250 000**. Brasília: IBGE, 2017a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Unidades da Federação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b. Disponível em: http://www.metadados.geo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/metadata.show?uuid=702106a2-c6ca-47d3-bde3-87e2723d0d82. Acesso em: 16 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Anomalia de precipitação trimestral**. Brasília: INMET, 2019. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/progp/0>. Acesso em: 17 set. 2020.

JUNQUEIRA-BROD, T.C.; ROIG, H.L.; GASPAR, J.C.; BROD, J.A.; MENESES, P.R. A província alcalina de Goiás e a extensão do seu vulcanismo kamafugítico. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 559-566, dez. 2002.

KING, L.C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 147-266, abr./jun.1956.

LE MAITRE, R.W. Classification and nomenclature. *In*: LE MAITRE, R.W. (ed.) **Igneous rocks: a classification and glossary of terms**. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2002. 236p, p. 23-28.

MANO, E.S. **Influência dos argilominerais dos minérios de níquel lateríticos na recuperação deste metal**. 2013. 148f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DINIZ, J.A.O.; MONTEIRO, A.B.; SILVA, R.C.; PAULA, T.L.F. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo**: nota técnica. Recife: CPRM, 2014. 1 DVD, Escala: 1.5.000.000. (Programa de Cartografia Hidrogeológica).

MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. *In*: MANTESSO-NETO, V.; CARNEIRO, C. Dal Ré; NEVES, B.B.B.; ALKIMIM, F.F.; BARTORELLI, A. (org.). **Geologia do Continente Sul-Americano**: evolução da obra de Fernando Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. cap. 15, p. 246-263.

MARSH, E.; ANDERSON, E.; GRAY, FLOYD. **Nickel-cobalt laterites - a deposit model**: chapter H in mineral deposit models for resource assessment. Reston: USGS, 2013. (USGS Scientific Investigations Report 2010-5070-H).

MELFI, A.J.; TRECASSES, J.J.; CARVALHO, A.; OLIVEIRA, S.B.B.; RIBEIRO FILHO, E.; FORMOSO, M.L.L. The lateritic ore deposits of Brazil. **Sciences Géologiques: Bulletin**, Strasbourg, v. 41, n. 1, p. 5-36. 1998.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In*: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (org.). **Geologia do Continente Sul-Americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. Cap. 16, p. 265-291.

MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. Orogenias paleozoicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 473-484, dez. 1998.

MILANI, E.J.; MELO, J.H.G. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov. 2007.

MORETON, L.C. **Iporá, Folha SE-22-V-B**: estado de Goiás. Brasília: CPRM, 2001.

MOURA, C.O. **Geologia do sudoeste do estado de Goiás**: integração de dados geológicos e aerogeofísicos de alta densidade. 2007. 149f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MUDD, G.M. Nickel sulfide versus laterite: the hard sustainability challenge remains. *In: ANNUAL CONFERENCE OF METALLURGIST*, 48., 2009, Ontario-Canada. **Proceedings** [...] Ontário: Canadian Metalurgical Society, 2009.

MUDD, G.M.; JOWITT, S.M. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments. **Economic Geology**, Chicago, v. 109, n. 7, p. 1813-1841, nov. 2014.

NASCIMENTO, M.A.L.S. Geomorfologia do Estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 12, n. 1, p. 1-22, jan./dez.1991.

NETO, F.T. **Controle na distribuição das lateritas e saprolitos de alto teor no depósito de níquel laterítico do Jacaré, distrito de Carajás, Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

OLIVEIRA, S.B. **Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero**. 1980. 238f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

OLIVEIRA, S.M.B. Estágio atual do conhecimento a cerca do minério laterítico de níquel no Brasil e no mundo. **Revista IG-USP**, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 49-57, jul./dez. 1990.

OLIVEIRA, S.B.; SILVA, M.L.M.C. As fases portadoras de níquel do minério laterítico de níquel do vermelho, Serra do Carajás (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 69-78, mar.1995.

PEDOSO, A.C.; SCHMALTZ, W.H. Jazimentos de níquel laterítico de Niquelândia, Goiás. *In: SCHOBENHAUS, C. (org.) Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília: DNPM: CRVD, 1986. v. 2, cap. 23, p. 307-314.

PIMENTEL, M.M.; FUCK, R.A. Late Proterozoic granitic magmatism in southwestern Goiás, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 415-425, dez. 1987.

RADAELLI, V.A. **Níquel do Morro do Engenho: Estado de Goiás**. Goiânia: CPRM, 2000. 10p.

ROBB, L. Surficial and supergene ore-forming processes. *In: ROBB, L. (org.) Introduction to ore-forming processes*. Massachusetts: Blackwell Publishing, 2005. Cap. 4, p. 219-245.

RODRIGUES, M.A.C.; PEREIRA, E.; BERGAMASCHI, S. Ocorrência de Psilophytales na Formação Furnas, borda leste da Bacia do Paraná. **Boletim do IG-USP**, Série Científica, São Paulo, v. 7, p. 35-43, abr. 1989.

RODRÍGUEZ, A.C.; FERRE, E.T.; FERNÁNDEZ, J.A.P.; PURÓN, A.L.R. Mineralogía del yacimiento laterítico niquelífero San Felipe, Camaguey, Cuba. **Minería e Geología**, Moa, v. 32, n. 1, p. 28-77, jan./mar. 2016.

SILVA, T.M. Superfícies geomorfológicas do planalto sudeste brasileiro: revisão teórico-conceitual. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 20, p. 1-22, 2009.

SOBRINHO, M.L.; ANDRADE, R.S. **Projeto Jussara: geologia das quadrículas de Britânia, Santa Fé, Araguapaz e Jussara, estado de Goiás**. Goiânia: DNPM/CPRM, 1971. v. 1.

SUPPI, I.M.; CAMPOS, M.L.; MIQUELUTTI, D.J.; BUENO, D.K. Teores de cobalto e manganês em solos de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Santa Catarina, v. 17, n. 4, p. 579-588, 2018.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A.; ADOLPHO, J. Intemperismo e Formação do Solo. *In*: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. cap. 8, p. 139-157.

TUREKIAN, K.K. Cobalt. *In*: BURNS, R.G.; BURNS, V.M. **Handbook of Geochemistry**. Berlin: Springer Verlag, 1974. p 27-B – 27-O.

ULRICH, M.; CATHELINEAU, M.; MUÑOZ, M.; BOIRON, M.-C.; TEITLER, Y.; KARPOFF, A.M. The relative distribution of critical (Sc, REE) and transition metals (Ni, Co, Cr, Mn, V) in some Ni-laterite deposits of New Caledonia. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 197, p. 97-113, fev. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2019**: report. Reston, 2019. 200p. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70202434>. Acesso em: 29 out. 2020.

VALADÃO, R.C. **Evolução de longo-termo do relevo do Brasil Oriental**: desnudação, superfícies de aplanamento e soerguimentos crustais. 1998. 243f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

WELLS, M.A.; RAMANAIDOU, E.R.; VERRALL, M.; TESSAROLO, C. Mineralogy and Crystal chemistry of “garnierites” in the Goro lateritic nickel deposit, New Caledonia. **European Journal of Mineralogy**, New Caledonia, n. 21, p. 467-483. 2009.