



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELO DE DEPÓSITO DO COMPLEXO MÁFICO-
ULTRAMÁFICO DE NIQUELÂNDIA, GO, COM BASE
EM DADOS MULTITEMÁTICOS.**

Inara Oliveira Barbosa

TESE DE DOUTORADO N° 06

Orientador

Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires (IG/UnB)

Co-orientadora:

Profa. Dra. Marilusa Pinto Coelho Lacerda (FAV/UnB)

Brasília, DF

2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL**

**MODELO DE DEPÓSITO DO COMPLEXO MÁFICO-ULTRAMÁFICO DE
NIQUELÂNDIA, GO, COM BASE EM DADOS MULTITEMÁTICOS.**

Tese de Doutorado

Inara Oliveira Barbosa

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires (IG/UnB)

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva (IG/UnB) – Examinadora Interna

Prof. Dr. Edson Eyji Sano (Embrapa) – Examinador Interno

Profa. Dra. Joselisa Maria Chaves (UEFS) – Examinadora Externa

Prof. Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho (UFV) – Examinador Externo

Brasília, 03 de setembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

A minha família, meus pais, meus irmãos e sobrinhos pelo apoio nos momentos bons e difíceis ao longo da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Augusto César Bittencourt Pires, pela sua orientação, apoio e por está sempre presente quando solicitado.

A minha co-orientadora Profa. Marilusa Pinto Coelho Lacerda pela amizade, discussões e incentivos ao longo dessa tese.

A Profa. Adriana Chatack Carmelo pelo auxílio no processamento dos dados aerogeofísicos, bem como por sua participação no comitê de acompanhamento dessa tese com suas contribuições relevantes.

A Minha amiga Sandra A. Pedrosa pelo incentivo no desenvolvimento dessa tese e pela paciência e compreensão.

Ao Luiz Paulo Beghelli Junior e Jesus Aparecido Vieira da Cunha pela contribuição nas análises das amostras dessa tese.

A professora Edi Mendes Guimarães e em especialmente a Laura Flores Brant Campos pelas análises realizadas no Laboratório de Raios-X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília-UnB.

Ao prof. Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha e em especialmente a Camila Figueredo Oliveira pelas análises das amostras realizadas Laboratório de Espectrorradiometria da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

A empresa Votorantim Metais, Unidade Niquelândia – GO, pela permissão ao acesso a área de estudo.

RESUMO

A integração de dados multitemáticos por meio de geotecnologias têm sido de fundamental importância no mapeamento geológico e definição de modelos de distribuição de depósitos minerais. No caso específico de ambientes mineralizados, objeto do estudo, que apresentam associação de exposição de rochas com suas coberturas superficiais intempéricas, não existe um modelo padronizado a ser utilizado na distribuição espacial das áreas mineralizadas, em função da grande variabilidade que pode ocorrer na geologia, geomorfologia e nas condições de pedogênese e enriquecimento mineral associado aos processos de alteração. Assim, o objetivo desse trabalho foi à correlação de dados aerogeofísicos (magnetométricos e gamaespectrométricos), com relevo, solos e geologia na individualização do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, GO e de suas unidades adjacentes, bem como gerar um mapa de favorabilidade do depósito do níquel laterítico na porção ultramáfica desse Complexo. Foi criado um banco de dados georreferenciados com informações disponíveis sobre geologia, geomorfologia, solos, dados aerogeofísico e de imagem do sensor ASTER. As feições do relevo foram geradas por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT) extraído dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), sendo dele derivados os mapas de classes declividade, hipsométrica e curvatura, que constituem as feições do relevo que condicionam a formação da mineralização pedogenética de níquel. Os dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria foram extraídos do levantamento aerogeofísico de Goiás do Projeto “Paleo-neoproterozóico do Nordeste de Goiás”. Com os dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) foram gerados dois Índices Máficos (IM) o primeiro do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e o segundo do depósito de níquel laterítico no município de Niquelândia. Com a imagem de satélite do sensor ASTER foi realizado a razão de bandas para destacar as áreas ricas em Fe^{3+} e o emprego Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), na identificação de áreas com concentração de minério de níquel oxidado (goethita e hematita) e minério de níquel silicatado (pimelita), com a utilização da biblioteca espectral criada com as amostras dos minérios oxidado e silicatado e solos. Com esses dados processados foi realizado duas abordagens distintas de análise espacial na área de estudo. A primeira foi à individualização do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia de suas unidades geológicas adjacentes por meio do estabelecimento de domínios gamaespectrométricos e magnetométricos associados aos dados de relevo, geologia e solos. A segunda com a geração do mapa de favorabilidade e definição de um modelo descritivo do depósito de níquel laterítico na porção ultramáfica do Complexo de Niquelândia. Os métodos utilizados para geração dos mapas de favorabilidade foram as lógicas booleana e *fuzzy*. A definição do primeiro Índice Máfico (IM) permitiu a delimitação dos corpos máficos e ultramáficos, eliminando a influência da cobertura pedológica e o segundo Índice Máfico (IM) possibilitou a individualização do depósito de níquel

laterítico nas rochas ultramáficas do Complexo. A utilização de imagem do sensor ASTER possibilitou a delimitação de áreas enriquecidas em níquel no minério oxidado, no minério silicatado e nos solos. A correlação com os dados aerogeofísicos, geológicos, relevo e solo permitiu caracterizar e individualizar o Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia das suas unidades geológicas adjacentes, constituídas por litologias distintas. O modelo estabelecido e os mapas de favorabilidade de mineralização de níquel no Complexo de Niquelândia, gerados pelas lógicas booleana e *fuzzy* apresentaram bons resultados, entretanto o *fuzzy* mostrou-se no mapeamento resultado superior.

ABSTRACT

The integration of data from varied sources has been of fundamental importance for geologic mapping and definition of models for the distribution of mineral deposits. In the specific case of mineralized environments, object of the study, show that the association of exposure with their cover of rocks weathering surface there is no one standard model to be used in the spatial distribution of the mineralized areas, due to the large variability that can occur in geology, geomorphology and conditions of pedogenesis and mineral enrichment processes associated with change. The objective of this study was the correlation of the airborne geophysical data (gamma spectrometry and magnetometric), with relief, soils and geology in the individualization Mafic-Ultramafic Complex Niquelândia, GO, and its adjacent units, as well as generate a favorability of lateritic nickel deposit in portion of ultramafic complex. It created a georeferenced database with information available on geology, geomorphology, soils, airborne geophysical data and ASTER image. The relief features were generated by means of Digital Terrain Model (DTM) extracted data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), it being derived from the maps of slope, hypsometric and curvature classes, which constitute the relief features that, influence the formation of nickel mineralization pedogenetic. The airborne geophysical data of magnetometry and gamma spectrometry were extracted from the airborne geophysical survey of Goiás Project "of Northeastern Paleo-Neoproterozoic Goiás". With the airborne geophysical data (magnetometry and gamma spectrometry) were generated two Mafic Indexes (MI) the first Mafic-Ultramafic Complex Niquelândia and the second of nickel laterite of deposit in the city of Niquelândia. With satellite imagery ASTER was carried the reason bands to highlight areas rich in Fe^{3+} and employment Linear Spectral Unmixing Model (LSUM), to identify areas with concentration of nickel oxides (goethite and hematite) and nickel ore silicate (pimelite), using the spectral library created with the samples of oxidized ores and silicate and soils. With these processed data was performed two distinct approaches to spatial analysis in the study area. The first was the individualization Mafic-Ultramafic Complex Niquelândia its adjacent geological units through the establishment of gamma spectrometric and magnetometric fields associated with data of topography, geology and

soils. The second generation of the map with the favorability and definition of a descriptive model of nickel laterite deposit in ultramafic portion of the complex Niquelândia. The methods used to generate the maps were the favorability of Boolean and fuzzy logics. The definition of the first Mafic Index (MI) allowed the delineation of mafic and ultramafic, eliminating the influence of pedologic cover and the second Mafic Index (MI) allowed the individualization of lateritic nickel deposit in ultramafic rocks of the Complex. Using ASTER image allowed the delineation of areas enriched in nickel oxide ore, the ore and silicate soils. The correlation with the airborne geophysical data, geology, topography and soil allowed characterizing and individualizing Mafic-Ultramafic Complex Niquelândia its adjacent geologic units, consisting of different lithologies. The established model and favorability maps of nickel mineralization in complex Niquelândia, generated by Boolean logic and fuzzy showed good results, however the fuzzy proved mapping result in higher.

SUMÁRIO

CAPITULO 1

1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO	2
1.4. MATERIAIS E MÉTODOS	2
1.5. ESTRUTURA DA TESE	3

2. *CAPITULO 2*

Correlação Geológica, Aerogeofísica, Relevo e Solos na Individualização do Complexo de Niquelândia, GO.

RESUMO	5
ABSTRACT	5
2.1. INTRODUÇÃO	6
2.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	7
2.2.1. Contexto Geológico	7
2.2.2. Geomorfologia	10
2.2.3. Solos	12
2.3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
2.3.1. Relevo	13
2.3.2. Processamento de Dados Aerogeofísicos	14
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
2.4.1. Relevo	17
2.4.2. Gamaespectrometria	19
2.4.3. Magnetometria	25
2.4.4. Índice Máfico	26
2.4.5. Perfis da Integração de Dados Geofísicos, Litológicos e Hipsométricos	27
2.5. CONCLUSÕES	29
2.6. REFERÊNCIAS	30

CAPITULO 3

Integração de Mapas Multitemáticos no Modelo de Favorabilidade do Depósito de Níquel laterítico em Niquelândia

RESUMO	37
ABSTRACT	37
3.1. INTRODUÇÃO	38

3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO	40
3.3. GÊNESE DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO E RELEVO	42
3.4. VEGETAÇÃO	45
3.5. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.5.1. Processamento de Dados Aerogeofísicos	45
3.5.1.1. Dados gamaespectrométricos	47
3.5.1.2. Dados Magnetométricos	47
3.5.2. Relevo	48
3.5.3. Processamento da Imagem do Sensor ASTER	49
3.5.3.1. Razão de Bandas	50
3.5.3.2. Mapeamento Espectral	51
3.5.4. Integração de Dados	52
3.5.4.1. Lógica Booleana	52
3.5.4.2. Lógica <i>Fuzzy</i>	54
3.6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
3.6.1. Relevo	57
3.6.2. Índice Máfico	59
3.6.3. Sensoriamento Remoto	61
3.6.3.1. Razão de Bandas	61
3.6.3.2. Mapeamento Espectral	62
3.6.4. Modelo de Distribuição do Depósito de Níquel Laterítico	66
3.6.4.1. Lógica Booleana	66
3.6.4.2. Lógica <i>Fuzzy</i>	69
3.7. CONCLUSÕES	72
3.8. REFERÊNCIAS	73

CAPITULO 4

Conclusões Finais	82
Recomendações	84
Anexo	85

LISTAS DE FIGURAS e TABELAS

Capítulo 1

Figura 1 - Mapa de localização das áreas de estudos situadas no município de Niquelândia, Goiás 2

Capítulo 2

Figura 1 - Mapa de Localização da Área de Estudo 7

Figura 2 - Mapa Geológico Simplificado da Província Tocantins. Fonte: Fuck (1994)	8
Figura 3 - Mapa Geológico da Área de Estudo. Fonte: Moreira, <i>et al.</i> , 2008	9
Figura 4 - Mapa de Compartimentação Geomorfológica. Fonte: Latrubesse & Carvalho, 2006	11
Figura 5 - Mapa de Solos da Área de Estudo. Fonte: Almeida <i>et al.</i> , 2006	12
Figura 6 - Fluxo do Processamento dos Dados Aerogeofísicos Aplicados	15
Figura 7 - Mapa Hipsométrico da Área de Estudo Extraído do SRTM	18
Figura 8 - Mapa de Declividade da Área de Estudo Extraído do SRTM	18
Figura 9 - Mapa do Canal de Potássio	19
Figura 10 - Mapa do Canal de Tório	20
Figura 11 - Mapa do Canal de Urânio	20
Figura 12 - Imagem Gamaespectrometria Associado Modelo Digital de Terreno (2,5D)	21
Figura 13 - Domínios Gamaespectrométricos Interpretados a partir das Imagens Ternárias em RGB e CMY, e canais de K (%), eTh, eU e integrado ao Modelo Digital do Terreno- SRTM	21
Figura 14 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico	25
Figura 15 - Domínios Magnético com utilização do ASA	26
Figura 16 - Mapa do Índice Máfico da área de estudo	27
Figura 17 - Perfis da linha de controle do K, eU, eTh, CMA, Litologia e Relevo (direção W-E)	28
Tabela 1 - Dados do levantamento magnetométrico e gamaespectrométrico	14
Tabela 2 - Caracterização dos domínios gamespectrométricos	22

Capítulo 3

Figura 1 - Localização da área de estudo do depósito de níquel de Niquelândia, GO	40
Figura 2 - Mapa geológico do trabalho final do curso de geologia-UnB. Fonte: Danni <i>et al.</i> , 1977	41
Figura 3 - Seção geológica do depósito de níquel. Fonte: Oliveira <i>et al.</i> , 1992	43
Figura 4 - Perfil de intemperismo da mina de Niquelândia . C= caulinita, G = goethita; Gib = gibsitita H = hematita; Sap = saponita; Ant = antigorita; P = pimelita. Letras maiúsculas = muita abundância; letras minúsculas = pouca abundância. Fonte: Carvalho Junior <i>et al.</i> , 2003	44
Figura 5 - Etapas do processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos	46
Figura 6 - Intervalo espectrais das bandas da imagem do sensor ASTER	49
Figura 7 - Fluxograma dos procedimentos realizados na imagem do sensor ASTER	50
Figura 8 - Curvas espectrais das amostras do minério oxidado (vermelho), solo (magenta) e minério silicatado (azul). As curvas foram extraídas das amostras do minérios e do solo com uso do espectrorradiômetro (a) e reamostradas para resolução espectral da imagem do sensor ASTER (b)	51

Figura 9 - Diagrama de Venn apresentado os operadores OR, AND, NOT e XOR da lógica booleana. Fonte: Burrough & McDonnell, 1998	53
Figura 10 - Fluxograma do modelo booleana do depósito de níquel laterítico	54
Figura 11 - Distribuição da função <i>fuzzy</i> para distintos valores de γ (entre 0 e 1). Modificado por Moreira da Silva, 2001	55
Figura 12 - Fluxograma do modelo <i>fuzzy</i> do depósito de níquel laterítico	56
Figura 13 - Foto panorâmica do relevo do depósito de níquel laterítico, mostrando feições geomorfológicas da área de estudo. Ao fundo pode-se ver a mina denominada Fazendinha	57
Figura 14 - Mapa altimétrico com a variações do valores presentes na área de estudo (a). Mapa altimétrico reclassificado (b)	58
Figura 15 - Mapa de declividade (a) e de curvatura (b) da área de estudo	59
Figura 16 - Índice Máfico (IM) apresentado valores altos (vermelho), valores baixo (verde) e valores muito baixo (azul)	60
Figura 17 - Imagem do sensor ASTER de 2001 com composição RGB231 (a). Modelo Digital de Terreno com sobreposição da razão de bandas RFe^{3+}/RFe^{2+} e cavas da mina de níquel laterítico (b)	61
Figura 18 - Perfil de alteração do depósito de níquel laterítico de Niquelândia (perfil de detalhe em azul) (a). Perfil de alteração detalhada com indicação das amostras e curvas espectrais dos minérios oxidados, silicatado (b). Perfil do solo e respectiva curva espectral da amostra do horizonte A (c)	62
Figura 19 - MLME em composição colorida RGB – oxidado, silicatado e solos (a). Modelo Digital do Terreno (MDT) com sobreposição da banda do solo extraído do MLME e cavas com extração do minério de níquel (b)	64
Figura 20 - Imagem Bing Maps com sobreposição da banda do minério silicatado extraído do MLME	65
Figura 21 - Modelamento do potencial na distribuição do minério de níquel de Niquelândia, gerado pela lógica booleana disposto sobre MDT com as cavas das minas	67
Figura 22 - Sobreposição do resultado da curva espectral do solo obtida pela MLME sobre o modelo booleano e MDT	68
Figura 23 - Modelamento do potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico de Niquelândia gerado pela lógica <i>fuzzy</i> sobreposto ao MDT com as cavas das minas. Mostra a variação de 0 (muito baixa) a 1 (muito alta) do potencial de favorabilidade do níquel laterítico	70
Figura 24 - Sobreposição do resultado da curva espectral do solo obtido pelo MLME sobre o modelo fuzzy e MDT	71
Tabela 1 - Dados do levantamento magnetométrico e gamaespectrométrico	44

CAPITULO 1

1.1. INTRODUÇÃO

Esta tese apresenta um estudo da correlação e integração dos dados geológicos, aerogeofísicos e geomorfológicos do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia-GO, bem como de áreas adjacentes. Esse trabalho foi desenvolvido em duas áreas de interesse. A primeira área teve um caráter mais regional e a segunda área de estudo teve um foco mais local mais precisamente na porção ultramáfica do Complexo de Niquelândia. Os Complexos de Niquelândia, Barro Alto e Cana Brava, compõem o maior conjunto de intrusões máfico-ultramáficas acamadadas da região central do Brasil. O Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia representa uma intrusão acamadada situada na Província Tocantins e está subdividido em: Sequência Magmática Inferior (Zona Máfica Inferior, Zona Ultramáfica e Zona Máfica Superior) e Sequência Magmática Superior. Apresenta contatos com as rochas da Sequência Vulcano-Sedimentar de Indaianópolis, Complexo Granito-Gnáissico, Grupo Serra da Mesa e Grupo Paranoá. Os Complexos Máfico-Ultramáficos de Niquelândia e Barro Alto são unidades importantes no contexto geológico brasileiro, pela ocorrência de depósitos minerais, onde a mineralização é de origem pedogenética, entretanto não se verificou estudos desta natureza que permitam a caracterização e individualização espacial dessas ocorrências. No pólo minero-metalúrgico do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia a formação do depósito de níquel laterítico foi desenvolvidos a partir de processos de alteração sobre a zona ultramáfica e a qual é composta por piroxenitos e peridotitos/dunitos parcialmente serpentinizados. As Serras da Mantiqueira e dos Borges representam o relevo do Complexo de Niquelândia que refletem uma estrutura semicircular maciça, cujo relevo elevado circunda uma área central mais rebaixada representada por rochas sedimentares. O relevo apresenta-se como fator condicionante na pedogênese, conseqüentemente na distribuição dos solos e minérios associados.

1.2. OBJETIVOS

Objetivos principais:

- a) A correlação de dados aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos, com relevo, solos e geologia para a individualização do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e de suas unidades adjacentes.
- b) A geração do modelo de distribuição do depósito de níquel nas rochas ultramáficas do Complexo de Niquelândia, por meio de análise integrada de dados geológicos, geomorfológicos, aerogeofísicas e de sensoriamento remoto.

1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

As áreas de estudo localizam-se no estado de Goiás, município de Niquelândia, no Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia. O acesso se dá, a partir de Brasília, pela rodovia BR-080 até a cidade de Padre Bernardo. De Padre Bernardo segue pela BR080 até BR414 e prossegue por essa rodovia em direção a Niquelândia (Figura 1).

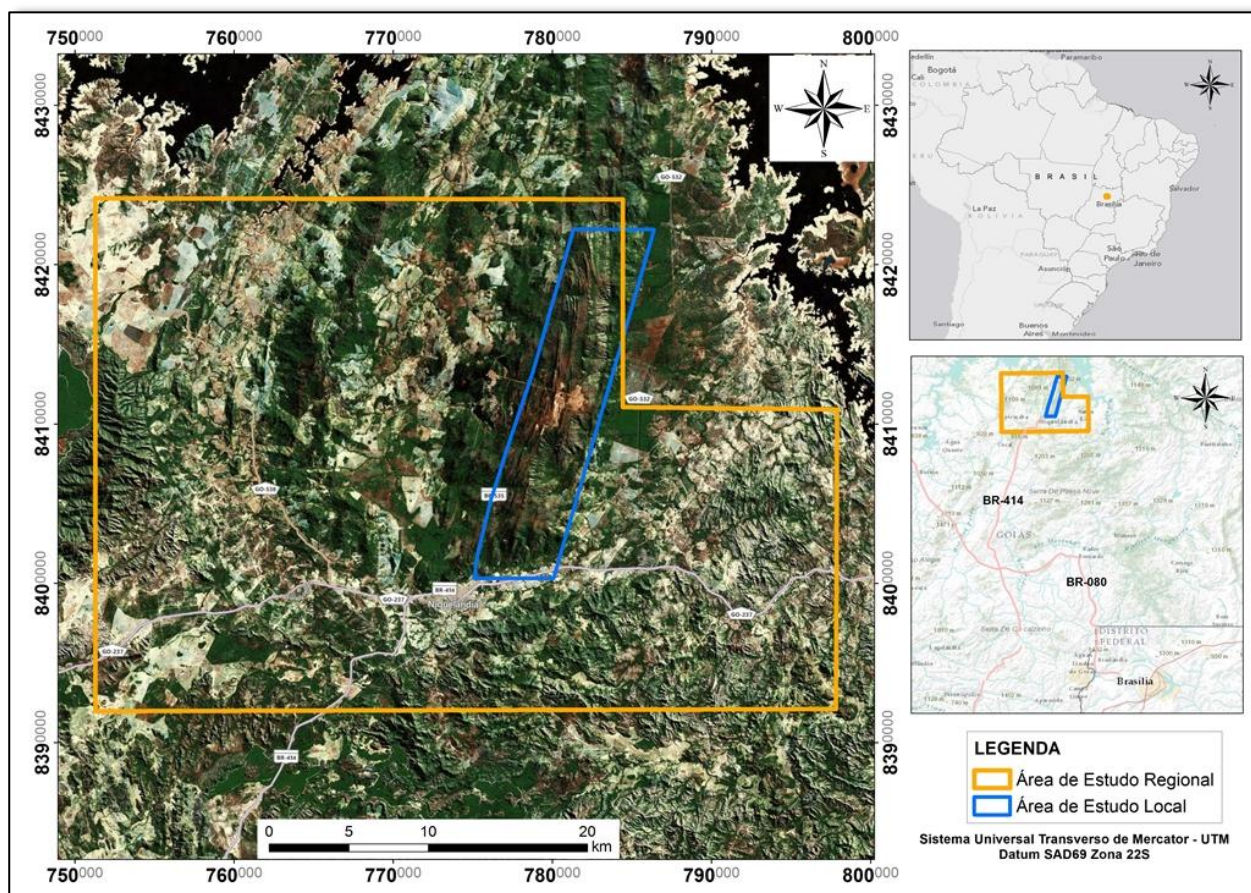


Figura 1 – Mapa de localização das áreas de estudos situadas no município de Niquelândia, Goiás.

1.4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi subdividido em quatro etapas. Na primeira etapa foi realizada a definição das variáveis a serem utilizados na análise e na compilação dos dados digitais.

A segunda etapa correspondeu à obtenção dos dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria, extraídos do levantamento aerogeofísico de Goiás do Projeto “Paleoneoproterozóico do Nordeste de Goiás”, seguida de processamento destes dados, por meio de técnicas de geoprocessamento, visando à elaboração de mapas de espacialização dos mesmos. Os dados aerogeofísicos foram interpolados utilizando o método mínima curvatura para os dados de gamaespectrometria (K, eU e eTh) e método bi-direcional para os dados de magnetometria. Com o campo magnético anômalo (CMA) foi obtido às derivadas horizontais (Dx e Dy) e a derivada vertical (Dz) e por intermédios destes foi gerada a amplitude do sinal analítico (ASA). A combinação do ASA e dos dados gamaespectrométricos (K, eU e eTh) foi criada os Índices Máficos

(IM). O primeiro IM na individualização das rochas máficas-ultramáficas do Complexo de Niquelândia; e o segundo IM para a delimitação do depósito de níquel laterítico nas rochas ultramáficas do Complexo de Niquelândia.

Nesta etapa, foi, também, elaborado o Modelo Digital de Terreno da área de estudo, por meio de dados extraídos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), para obtenção de feições do relevo de interesse ao trabalho (classes de declividade, hipsometria e curvatura).

A terceira etapa consistiu de atividades de sensoriamento remoto, com a utilização da cena LIB do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) de 21/08/2001, para discriminar os minérios de níquel ao longo das rochas ultramáficas do Complexo, por meio de técnicas de razão de bandas e mediante emprego do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) com a determinação de assinaturas espectrais do minério oxidado, minério silicatado e solos.

Na quarta e última etapa foram realizados a integração dos produtos gerados nas etapas anteriores, tais como a correlação dos mapas de geologia, aerogeofísica e relevo a fim de individualizar o Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia das unidades geológicas adjacentes bem como a utilização do IM. Para a obtenção do modelo de favorabilidade do depósito de níquel laterítico foi realizada a integração da geologia, do Índice Máfico e feições do relevo com emprego dos métodos booleano e fuzzy. Em seguida os modelos gerados foram validados utilizando a sobreposição das cavas das minas e produtos obtidos no processamento da imagem do sensor ASTER.

1.5. ESTRUTURA DA TESE

A tese foi organizada na forma de 2 artigos:

O primeiro intitulado: **Correlação Geológica, Aerogeofísica, de Relevo e Solos na Individualização do Complexo de Niquelândia, GO.**

O segundo intitulado: **Integração de Mapas Multitemáticos no Modelo de Favorabilidade do Depósito de Níquel Laterítico de Niquelândia.**

Um capítulo final com as principais conclusões dos dois artigos.

Artigo completo: Correlação Geológica, Aerogeofísica, Relevo e Solos na Individualização do Complexo de Niquelândia, GO foi submetido à Revista Brasileira de Geofísica.

CORRELAÇÃO GEOLÓGICA, AEROGEOFÍSICA, RELEVO E SOLOS NA INDIVIDUALIZAÇÃO DO COMPLEXO DE NIQUÊLANDIA, GO.

RESUMO

Os dados aerogeofísicos permitem a caracterização e individualização de solos espessos desenvolvidos a partir de um determinado substrato geológico. O objetivo deste trabalho foi à utilização de dados magnetométricos e gamaespectrométricos, juntamente com relevo, solos e geologia na caracterização e individualização do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e suas unidades adjacentes. Foi criado um banco de dados georreferenciados com informações disponíveis sobre geologia, geomorfologia e solos. As feições do relevo foram geradas por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT) extraído dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), sendo dele derivados os mapas de classes declividade e de classes hipsométricas. Os dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria foram extraídos do levantamento aerogeofísico de Goiás do Projeto “Paleo-neoproterozóico do Nordeste de Goiás”. Estes dados foram interpolados utilizando o método mínima curvatura para os dados de gamaespectrometria (K, eU e eTh) e método bi-direcional para os dados de magnetometria. Com o campo magnético anômalo foi obtida a amplitude do sinal analítico (ASA), e a partir do produto ASA juntamente com os dados gamaespectrométricos foi calculado o índice máfico (IM). O IM permitiu a delimitação dos corpos máficos e ultramáficos sem a influência do solo. A correlação com os dados aerogeofísicos, geológicos, relevo e solo permitiu caracterizar e individualizar o Complexo Máfico e Ultramáfico de Niquelândia das suas unidades geológicas adjacentes, constituídas por litologias distintas.

Palavras-chave: dados aerogeofísicos, hipsometria, intemperismo, complexo niquelândia.

ABSTRACT

The airborne geophysical data allow the characterization and individualization soil thick developed from a particular geological substrate. The objective of this work was the use of gamma spectrometry and magnetometry data, along with relief, soils and geology in the characterization and individualization of Mafic-Ultramafic Complex Niquelândia and its adjacent units. It created a database with georeferenced information available on geology, geomorphology and soil. The relief features were generated using the Digital Terrain Model (DTM) extracted data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), being derived from the maps of slope classes and classes hypsometric. The airborne geophysical data of magnetometry and gamma spectrometry were extracted from the airborne survey of Goiás Project "Northeastern the Paleo-Neoproterozoic Goiás." These data were interpolated using minimum curvature method for the gamma spectrometry data (K, eU and eTh) and bi-directional data magnetometry. With anomalous magnetic field was obtained analytical signal amplitude (ASA), and from ASA together with the gamma spectrometrics

data was calculated the mafic index (IM). The IM has allowed the delineation of mafic and ultramafic bodies without the influence of the soil. The correlation with the airborne geophysics, geology, topography and soil allowed characterizing and individualizing Mafic and Ultramafic Complex Niquelândia its adjacent geological units, consisting of different lithologies.

Keywords: airborne geophysics data, hypsometric, weathering, niquelandia complex.

2.1. INTRODUÇÃO

A utilização e integração de dados de fontes variadas têm sido de fundamental importância para mapeamento geológico e modelos de distribuição de depósitos minerais. No caso específico de ambientes que apresentam associação de exposição de rochas com suas coberturas superficiais intempéricas não existe um modelo padrão a ser utilizado na distribuição espacial. Recentemente, observam-se estudos desenvolvidos para gerar modelos e métodos que contribuam para a caracterização de rochas e material intemperizado, utilizando informações aerogeofísicas e de sensoriamento remoto (Souza Filho & Crósta, 2003; Carrino *et al.*, 2007; Teixeira *et al.*, 2006).

A geofísica vem trazendo grandes benefícios para a investigação de regiões de clima tropical, como do Brasil, onde os processos supergênicos levam à formação de solos espessos e a cobertura vegetal impede o acesso às informações sobre o substrato (Souza Filho & Crósta, 2003). A utilização da geofísica representa uma contribuição significativa para o avanço na identificação de unidades geológicas, na distribuição dos solos e na exploração mineral, em todos os tipos de terreno com afloramentos escassos e intemperismo acentuado.

Trabalhos realizados com integração de dados de diversas naturezas podem subsidiar o planejamento estratégico do setor mineral brasileiro, por meio de tecnologias modernas e fornecendo informações quantificadas sobre terrenos brasileiros mineralizados. Na medida em que se tem melhoria na qualidade dos dados com contextualização geológica e pedológica, há um aprimoramento na modelagem, além da agregação de outros métodos de análise quantitativa.

Os complexos máfico-ultramáficos de Niquelândia Cana Brava e Barro Alto são unidades importantes no contexto geológico brasileiro, pela ocorrência de depósitos minerais, onde a mineralização é de origem pedogenética, porém, não se verifica estudos desta natureza que permitam a caracterização e individualização espacial destes complexos. O relevo apresenta-se como fator condicionante na pedogênese, conseqüentemente na distribuição dos solos e minérios associados. A magnetometria permite mapear litologias ricas em ferro e a gamaespectrometria mostra a distribuição de K, eU e eTh que são elementos diretamente relacionados às composições mineralógicas das rochas e solos.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é a correlação de dados aerogeofísicos (magnetométricos e gamaespectrométricos), juntamente com relevo, solos e geologia na individualização do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e de suas unidades adjacentes.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no estado de Goiás, município de Niquelândia, no Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Niquelândia e unidades adjacentes (Figura 1).

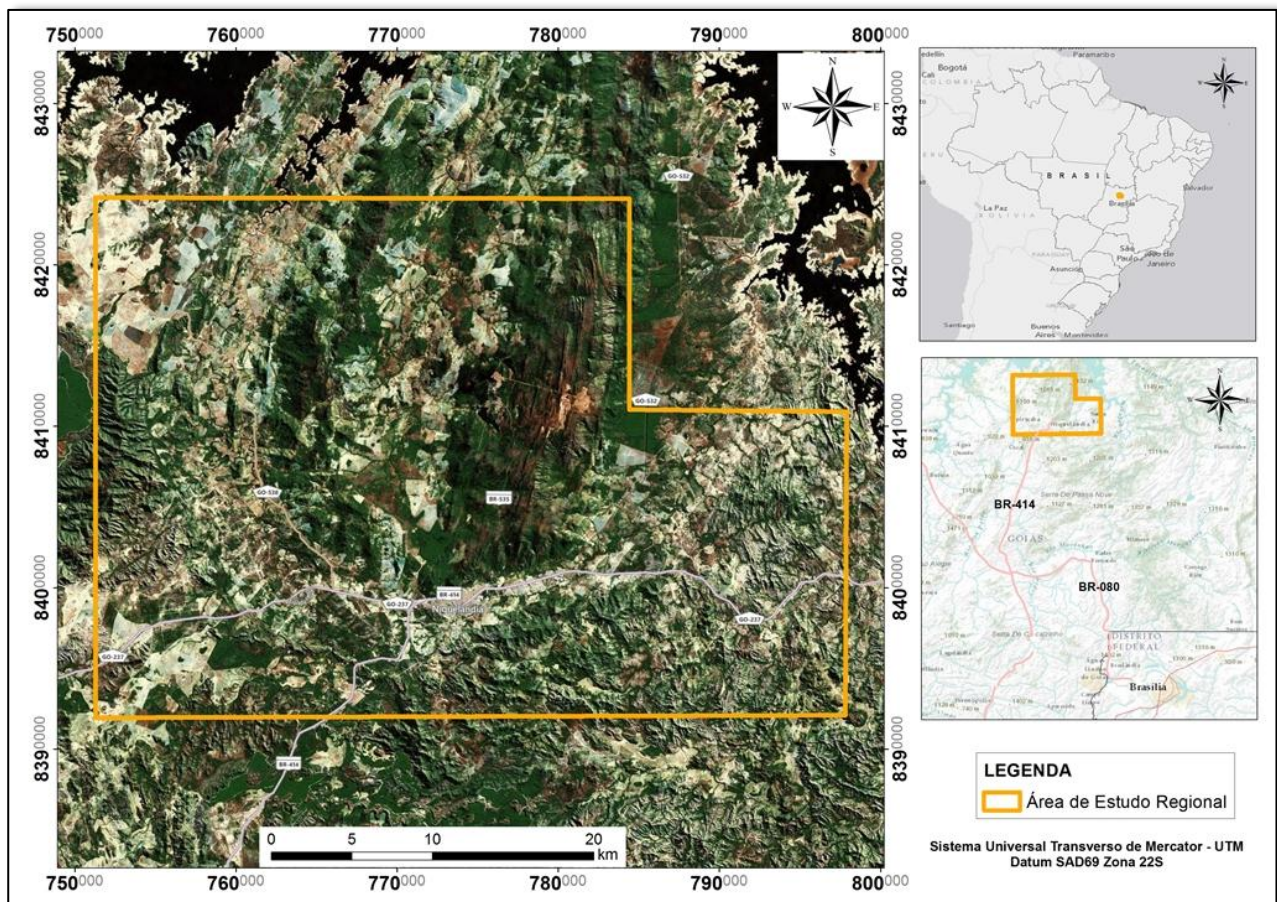


Figura 1 - Mapa de Localização da Área de Estudo.

2.2.1. Contexto Geológico

O Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e unidades adjacentes estão inseridos na Província Tocantins (Mantovani & Brito Neves, 2005), um extenso orógeno colisional de idade neoproterozóica, gerado entre os crátons Amazônico (margem passiva), São Francisco/Congo e Parapanema (margem ativa). Segundo Pimentel *et al.* (1991), Pimentel & Fuck (1992) e Fuck *et al.* (2006), a Província é dividida em três cinturões dobrados supracrustais conhecidos como faixas Araguaia, Paraguai e Brasília.

Destacam-se na Província do Tocantins os Complexos Máfico-Ultramáficos de Cana Brava, Niquelândia, Barro Alto ao norte e pelo complexo granulítico Anápolis-Itauçu ao sul (Hasui & Almeida, 1970).

Na porção centro-norte da Província Tocantins, onde se localiza a região de Niquelândia, ocorrem em duas unidades geotectônicas: o Maciço de Goiás e a Faixa Brasília (Fuck, 1994) (Figura 2).

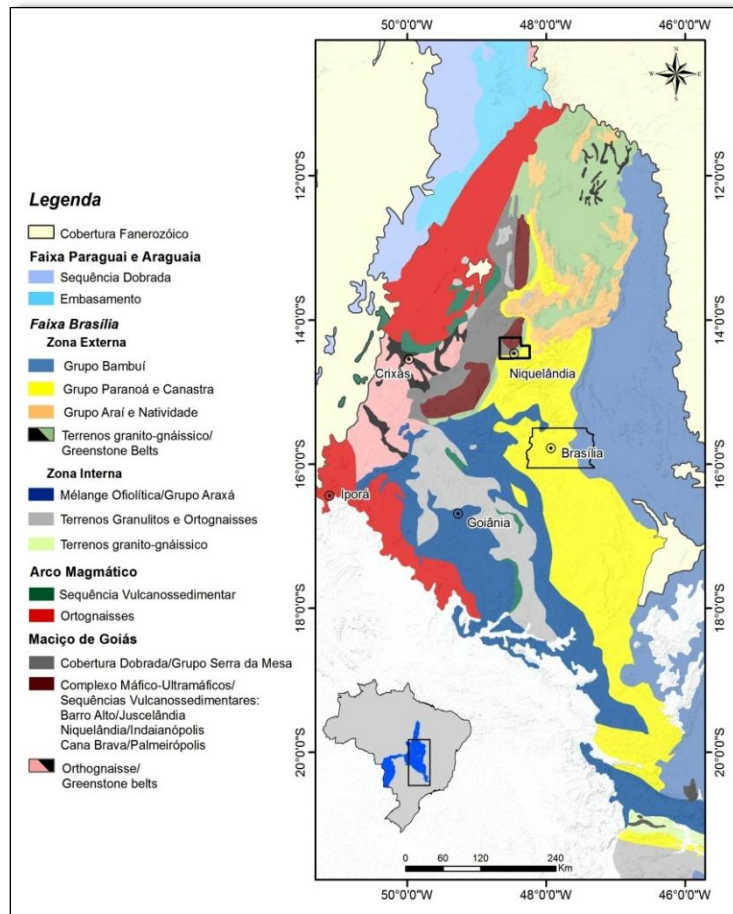


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Província Tocantins. Fonte: Fuck (1994).

As principais unidades geológicas da área de estudo compreendem parte do Maciço de Goiás, constituído pelo Grupo Serra da Mesa, pela sequência vulcano-sedimentar de Indaianópolis, e pelo Complexo de Niquelândia. A zona externa composta por unidades do embasamento, recobertas pelas rochas metassedimentares neoproterozóicas do Grupo Paranoá (Figura 3).

O Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia apresenta uma forma ovóide, balizado por falhas, com aproximadamente 45 km de extensão na direção N10E. Tem sido alvo de muitos estudos, desde o primeiro trabalho de Pecora & Barbosa (1944) até os dias atuais. Durante este período muitas hipóteses foram postuladas sobre a sua origem, sendo que as mais controversas se referem a uma sequência máfica-ultramáfica acamadada, de acordo com os trabalhos de Motta *et al.* (1970; 1972), Danni & Leonardos (1978), Danni *et al.* (1982), Rivalenti *et al.* (1982), Girardi *et al.* (1986), Ferreira Filho *et al.* (1992; 1994), Ferreira Filho & Naldrett (1993), Brito Neves *et al.* (1995), Correia *et al.* (1996) e Pimentel *et al.* (2004). Entre as várias interpretações dadas para origem do complexo, as mais controvertidas estão entre sua origem sendo que Girardi *et al.* (1986) considera uma intrusão única e formada a partir de um mesmo magma parental e Ferreira Filho *et al.* (1994; 1998) consideram a existência de dois conjuntos de rochas cumuláticas petrologicamente distintos.

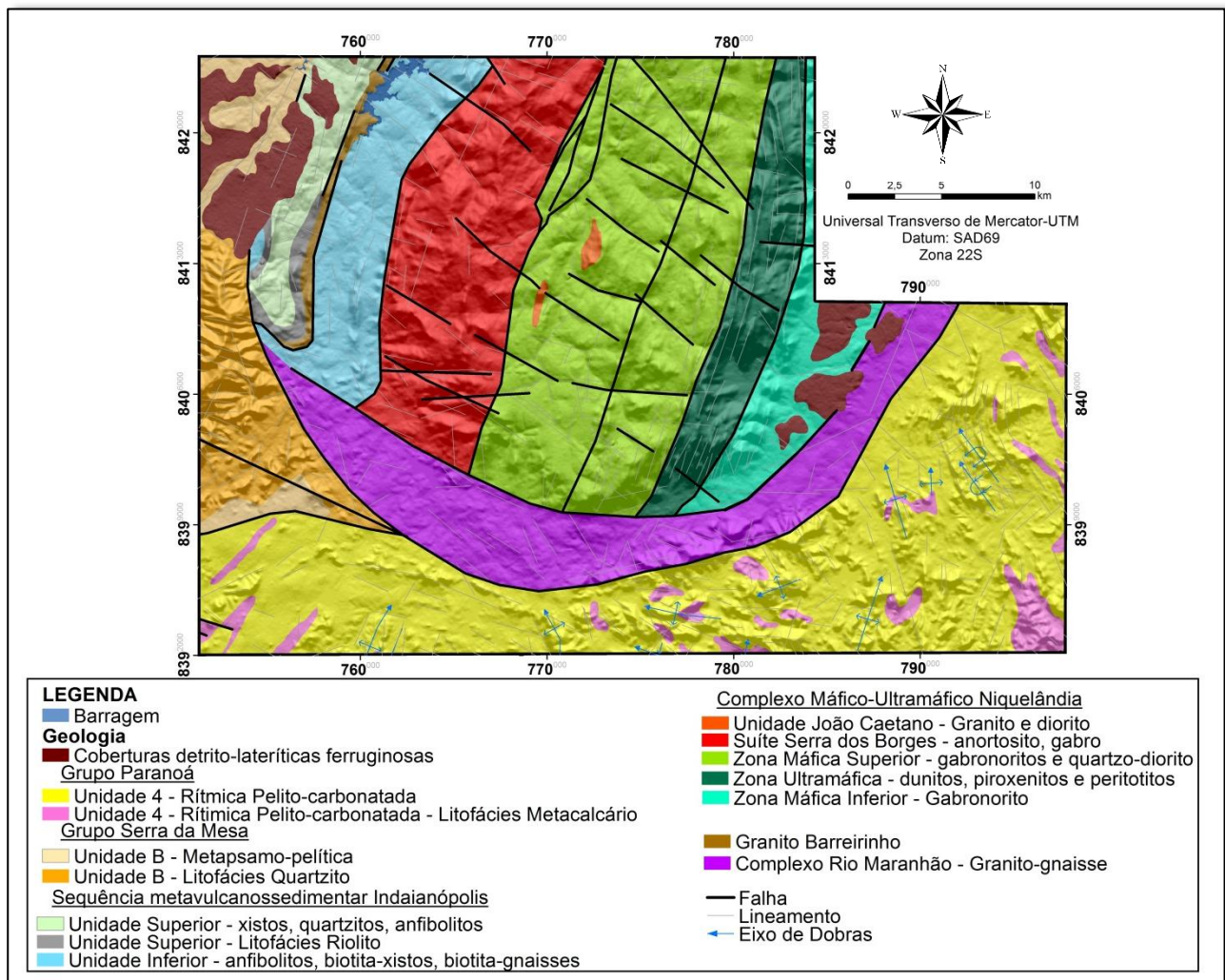


Figura 3 - Mapa Geológico da Área de Estudo. Fonte: Moreira, *et al.*, 2008.

Dados geológicos e geocronológicos (Correia *et al.*, 1996; 1997; 1999), Ferreira Filho & Pimentel (1999) e Medeiros & Ferreira Filho (2001) indicam que o Complexo de Niquelândia é constituído por: A) **Sequência Magmática Inferior** (Unidade da Serra da Mantiqueira) dividida em três zonas: i) Zona Máfica Inferior, constituída predominantemente de gabronorito com níveis secundários de piroxenito; ii) Zona Ultramáfica Intermediária, composta essencialmente por dunitos com piroxenitos intercalados e iii) Zona Máfica Superior, dominada por gabronoritos, com intrusões de quartzo-diorito. A Unidade João Caetano seria formada predominantemente por rochas intrusivas de composição granítica e diorítica; B) **Sequência Magmática Superior** (Unidade Serra dos Borges) formada por intercalações de leuco-troctolito, anortosito, gabro e olivina gabronorito, com piroxenito subordinado e níveis de óxidos de Fe-Ti (magnetita e ilmenita).

O embasamento de idade paleoproterozóica corresponde ao Complexo Rio Maranhão constituído por terrenos granito-gnáissicos de composição diorítica (Almeida *et al.*, 2006).

A Sequência metavulcanossedimentar de Indaianópolis associada ao Complexo de Niquelândia (Danni & Leonardos, 1980; Nascimento *et al.*, 1981) é constituída por remanescentes

de crosta oceânica de idade mesoproterozóica (1,2 Ga.) segundo Pimentel *et al.* (2000). Souza & Leão Neto (1998) a caracterizaram esta sequência como duas subunidades: inferior e superior. A **Sequência Inferior** é composta por anfibolitos finos intercalações de biotita-xistos, biotita-gnaisses, metacherts, formações ferríferas bandadas. A **Sequência Superior** é composta por riolitos e tufos riolíticos, xistos, quartzitos, anfibolitos finos e metacherts.

O Grupo Paranoá de idade mesoproterozóica de idade 1350 a 950 Ma (Dardenne, 1978; Dardenne & Faria, 1985; Faria & Dardenne, 1995) encontra-se subdividido em dez unidades mapeáveis distribuídas em duas sequências principais, na base psamo-pelítica e no topo psamo-pelítica-carbonática. Esta sequência psamo-pelito-carbonatada apresenta-se de variadas formas, dependendo da sua localização, podendo variar no grau de metamorfismo, nos tipos petrográficos e nas suas relações litoestratigráficas. Os processos tectono-metamórficos ocorreram durante a orogênese Brasileira, com ápice entre 0,65 e 0,60 Ga (Fuck *et al.*, 1988; Pimentel *et al.*, 1999).

Segundo Marini *et al.* (1977; 1984) o Grupo Serra da Mesa é formado por rochas sedimentares de idade paleo/mesoproterozóica e é constituído por quartzitos na base, seguido por micaxistos com granada, estauroлита e cianita, com intercalações de quartzitos finos e lentes de calcixistos e mármores, perfazendo um pacote com cerca de 1500 m de espessura. Segundo Dardenne (2000) apresenta evidências geocronológicas para a idade de deposição dos sedimentos entre 1,6 e 1,47 Ga, em ambientes continental e plataformal originados a partir da evolução de rifts.

A unidade detrítica-laterítica ferruginosa concentra-se como cobertura nas porções noroeste e leste da área estudada, constituída predominantemente por solos evoluídos, com concentração de sesquióxidos de ferro e alumínio, geralmente proveniente das litologias de origem.

2.2.2. Geomorfologia

Estudos geomorfológicos no Estado de Goiás principalmente em mapeamentos regionais, são escassos. As cartografias mais utilizadas são do Projeto Radam Brasil (1981), na escala 1:1.000.000. Trabalhos posteriores seguiram a mesma base metodológica do Projeto Radam-Brasil (1981), tais como os de Nascimento (1991) e Latrubesse & Carvalho (2006), que mais recentemente que apresentaram Projeto Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal, na escala de 1:500.000.

No trabalho publicado por Mamede *et al.* (1981), as Serras da Mantiqueira e dos Borges representam o relevo do Complexo de Niquelândia que refletem em uma estrutura semicircular maciça, cujo relevo elevado circunda uma área central mais rebaixada. Nessas serras, que constituem as bordas ocidental e oriental da grande estrutura de Niquelândia, as altitudes variam de 800 a 1.000m.

De acordo com Latrubesse & Carvalho (2006) as unidades representativas da geomorfologia na área de estudo são: As Superfícies Regionais de Aplainamento (SRA), Zona de Erosão Recuante

(ZER), Pseudo-domo (PSD), Morros e Colinas (MC) e Estruturas Dobradas formando *Hogbacks* (HB) (Figura 4).

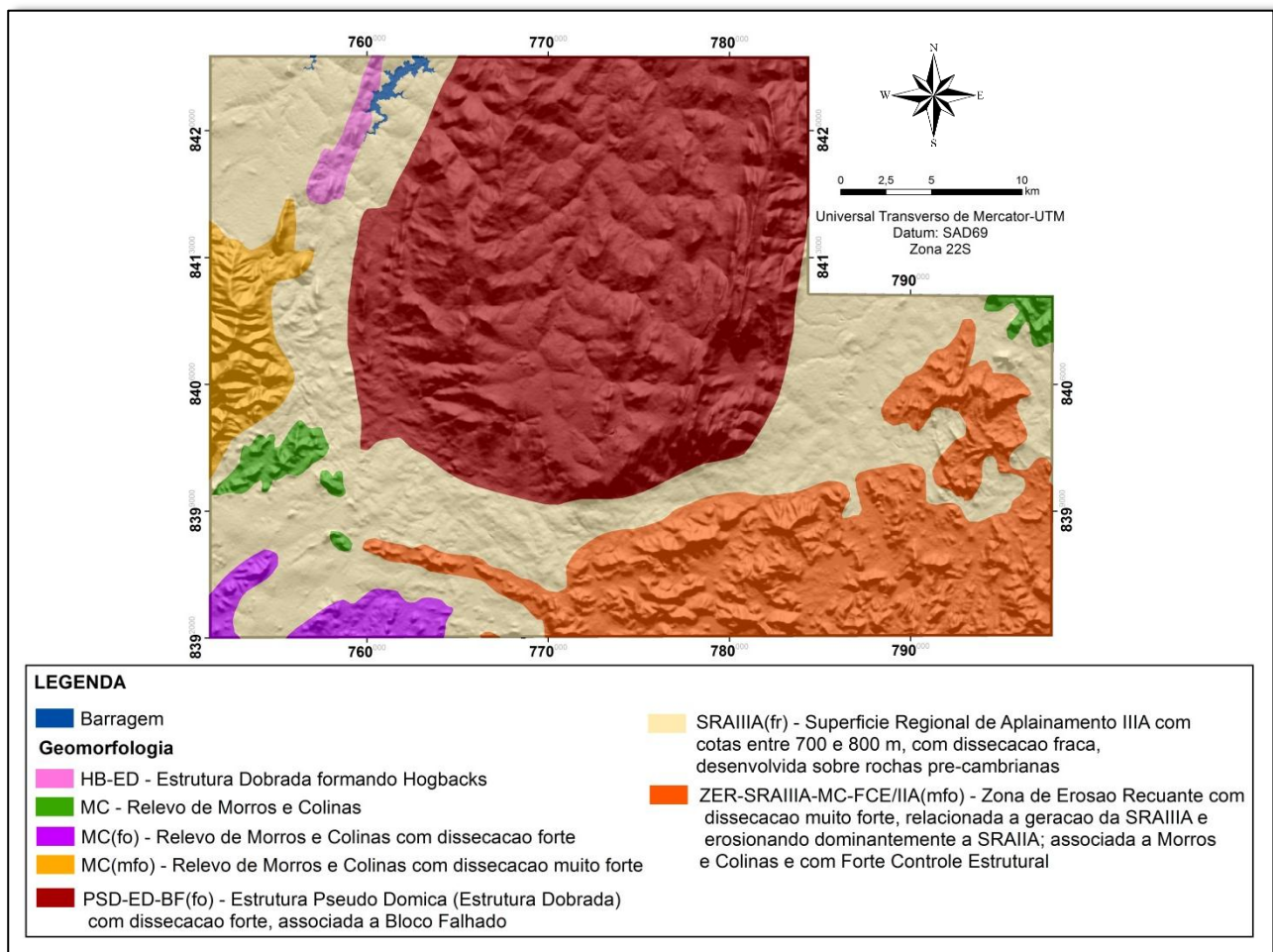


Figura 4 - Mapa de Compartimentação Geomorfológica. Fonte: Latrubesse & Carvalho, 2006.

A SRA é uma unidade denudacional, cujo aplainamento se deu de forma relativamente independente dos controles geológicos regionais (litologias e estruturas). A subunidade SRA-IIIa presente na área de estudo é desenvolvida sobre rochas pré-cambrianas, onde ocorrem crostas lateríticas, colúvios nas vertentes dos vales e áreas de sedimentação restrita, onde se acumularam sedimentos aluviais.

O Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia é constituído por uma sequência de intrusões acamadadas, que sob o ponto de vista geomorfológico é um exemplo de Pseudo-Domos (PSD), e apresenta-se com cerca de 40 x 15 km de extensão.

A Zona de Erosão Recuante (ZER) constitui uma zona de transição entre diferentes superfícies de aplainamento originadas por processos erosivos.

Os *Hogbacks* (HB) são estruturas dobradas nas quais o mergulho das rochas é superior a 20° e estão relacionadas ao intemperismo diferencial das rochas de relevo de morros e colinas (MC).

2.2.3. Solos

O atual mapa de solos do Estado de Goiás, foi elaborado pelo Projeto Levantamento Hidrogeológico do Estado de Goiás em escala 1:1.000.000 (Almeida *et al.*, 2006). Segundo esse mapa, os solos encontrados na área são: os Latossolos, divididos em Vermelhos e Vermelho-Amarelos, sendo que parte da área de estudo é coberta por Neossolos e Cambissolos, além de Argissolos (Figura 5).

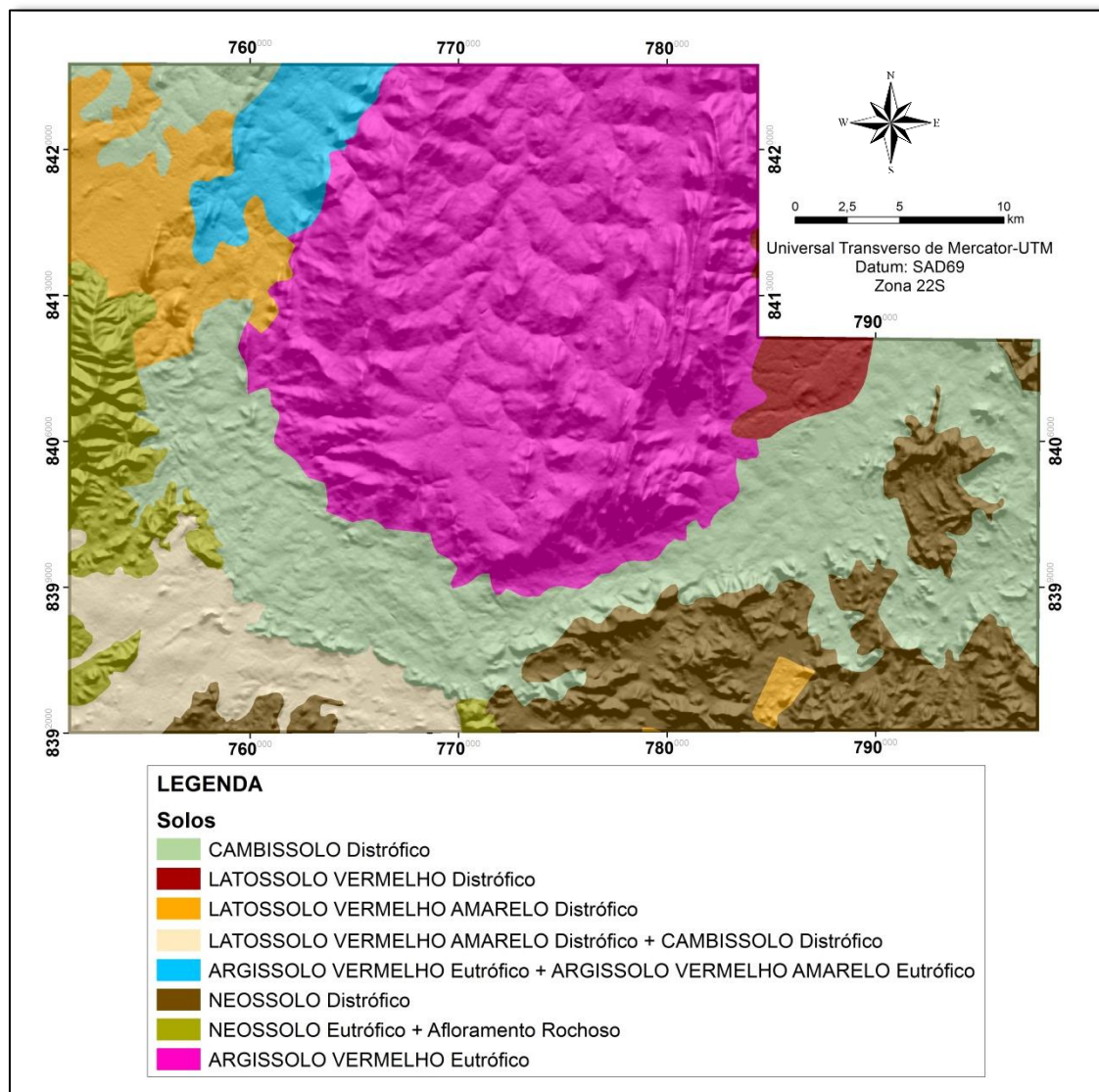


Figura 5 - Mapa de Solos da Área de Estudo. Fonte: Almeida *et al.*, 2006.

Os Latossolos Vermelhos são solos muito evoluídos em estágio avançado de intemperização, portanto são profundos e enriquecidos em óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Geralmente esses solos ocorrem em relevo plano a suave ondulado.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são similares aos Latossolos Vermelhos, sendo que a principal diferença está no horizonte B_w, onde os Latossolos Vermelho-Amarelos apresentam cor mais amarelada decorrente do predomínio da goethita (FeOOH) em relação à hematita (Fe₂O₃).

Os Cambissolos são solos rasos, de espessura no máximo de 50 cm e desenvolvem-se em regiões com declividades mais acentuadas.

Os Argissolos são solos com horizonte B textural, cuja mineralogia silicatada é representada por argilo-minerais de atividade baixa. São solos de profundidade variável, comumente com rochosidade.

Os Neossolos são solos pouco evoluídos onde predominam características do material parental e desenvolvem-se em regiões de relevos acidentados.

2.3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi subdividido em três etapas. Na primeira, foram definidos os parâmetros a serem utilizados na análise e na compilação dos dados digitais. A segunda etapa correspondeu ao processamento dos dados, por meio de técnicas de geoprocessamento, a fim de elaborar os mapas de distribuição de dados aerogeofísicos, declividade e altimetria. A etapa final consistiu na integração dos mapas gerados.

Foi criado um banco de dados georreferenciados com informações disponíveis sobre geologia (na escala 1:500.000; Moreira *et al.*, 2008), geomorfologia (na escala 1:500.000; Latrubesse & Carvalho, 2006), dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) (Lasa, 2006) e *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), 2000.

2.3.1. Relevô

As informações sobre o relevo foram geradas por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT), que são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, com valor de elevação em cada *pixel*.

Foram utilizados os dados de MDT de 2000, oriundos do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS) com dados topográficos (Modelo Digital de Terreno). Os dados SRTM apresentam resolução horizontal (resolução espacial) de 90 m e resolução vertical de 1 m.

Os dados SRTM foram transformados para vetor tipo ponto e, em seguida, foram interpolados a partir da aplicação da função *Topo to Raster* (Hutchinson, 1998; 1999), presente no ArcGIS 10, com *pixel* de 30 m x 30 m. Esse procedimento possibilitou uma melhor qualidade visual do MDT devido à mudança da resolução espacial para 30 metros, mas mantendo as informações da resolução original de 90 m (SRTM). O método se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos global de interpolação, como Krigagem e spline.

As informações do relevo foram geradas utilizando o MDT sendo dele derivados os mapas de classes de declividade e de hipsometria. Os mapas de classes de declividade e de hipsometria

foram as principais fontes de informações das feições do relevo na área de estudo, pois apresentam escalas mais compatíveis com aquelas dos mapas elaborados com os dados aerogeofísicos. Esses mapas foram utilizados na interpretação da distribuição de classes de solos e processos pedogenéticos associados, uma vez que o mapa de solos disponível apresenta escala muito pequena.

Os procedimentos foram efetuados em ambiente do Sistema de Informação Geografia (SIG), no software ArcGIS 10 e suas extensões *3D Analyst* e *Spatial Analyst* (Esri®, 2011).

2.3.2. Processamento de Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos de magnetometria (campo total) e gamaespectrometria (canais de potássio, tório e urânio) foram obtidos de dois arquivos no formato tabular do tipo ASCII (GDB) e foram importados para o software Oasis Montaj (Geosoft® 2009), para geração de mapas magnetométricos e gamaespectrométricos em escala 1:100.000.

A descrição da aquisição e correções dos dados aerogeofísicos foi obtida do relatório final do levantamento aerogeofísico do Estado de Goiás (magnetometria e gamaespectrometria) da área 5 denominada Projeto “Paleo-neoproterozóico do Nordeste de Goiás ”-Etapa 3, realizado em 2006 pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S/A (LASA, 2006) (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados do levantamento magnetométrico e gamaespectrométrico.

Métodos:	Magnetometria e Gamaespectrometria
Contratante:	Governo do Estado de Goiás/SIC-MME/CPRM Serviço Geológico do Brasil
Contratado:	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.
Período:	01/05/2006 a 01/09/2006
Intervalo (AM):	0,1s (magnetometria) e 1,0s (gamaespectrometria)
Altura de Voo:	100m
Direção (LV):	N-S
Espaçamento (LV):	0,5 km
Direção (LC):	E-W
Espaçamento (LC):	5 km
Tempo de Integração Gama	1

Após a aquisição dos dados aerogeofísicos, o primeiro passo no processamento foi o corte dos dados de acordo com a área de estudo e a avaliação dos dados obtidos. Os dados gamaespectrométricos foram cedidos já convertidos em porcentagem para o potássio (K) e em ppm para urânio (eU) e tório (eTh), dispensando a transformação das contagens por segundo (CPS).

Os dados gamaespectrométricos dos canais de K, eTh e eU mostraram alguns valores negativos devido à correção atmosférica não efetiva e/ou calibração dos instrumentos. Assim, o banco de dados gamaespectrométrico foi homogeneizado e para o canal do K(%) foi somado uma constante igual $\frac{1}{4}$ do desvio padrão dessa variável. Os dados eU e eTh não foram modificados. As correções foram efetuadas com objetivo de aproximar os valores das médias dos radioelementos em relação às rochas máficas (cerca de 1% K; 0,7 ppm U e 3 ppm Th) segundo Dickson & Scott

(1997). Em seguida, foram eliminados os valores negativos, que não foram utilizados na interpolação dos dados.

Para interpolação dos dados, o tamanho de célula unitária das malhas foi definido em 1/5 do espaçamento das linhas de voo, 100 m x 100 m, tentando evitar a perda de informação. Para esse tamanho de célula, o método de interpolação aplicado foi o de Curvatura Mínima (rangrid, Geosoft, 2009) para os dados da gamaespectrometria por melhor representar os dados originais e devido ao *trend* geológico ser aproximadamente paralela a direção da linha de voo. A Curvatura mínima gera uma superfície suavizada com os valores o mais próximo possível dos dados originais (Keckler, 1994).

Os dados do levantamento foram interpolados sem a utilização das linhas de controle, uma vez que a utilização do micronivelamento não possibilitou a total eliminação dos resíduos de “desnivelamento” que ainda permaneceram nos dados.

Entre os produtos utilizados para interpretação dos dados gamaespectrométricos aéreos foram geradas as imagens de K(%), eTh (ppm) e eU (ppm) e as composições ternárias RGB/KeTheU e CMY/KeTheU. Os mapas das razões Th/K, U/Th e U/K, muito usados para ressaltar contrastes entre os radioelementos, não foram usados neste trabalho por não apresentarem bons resultados (Figura 6).

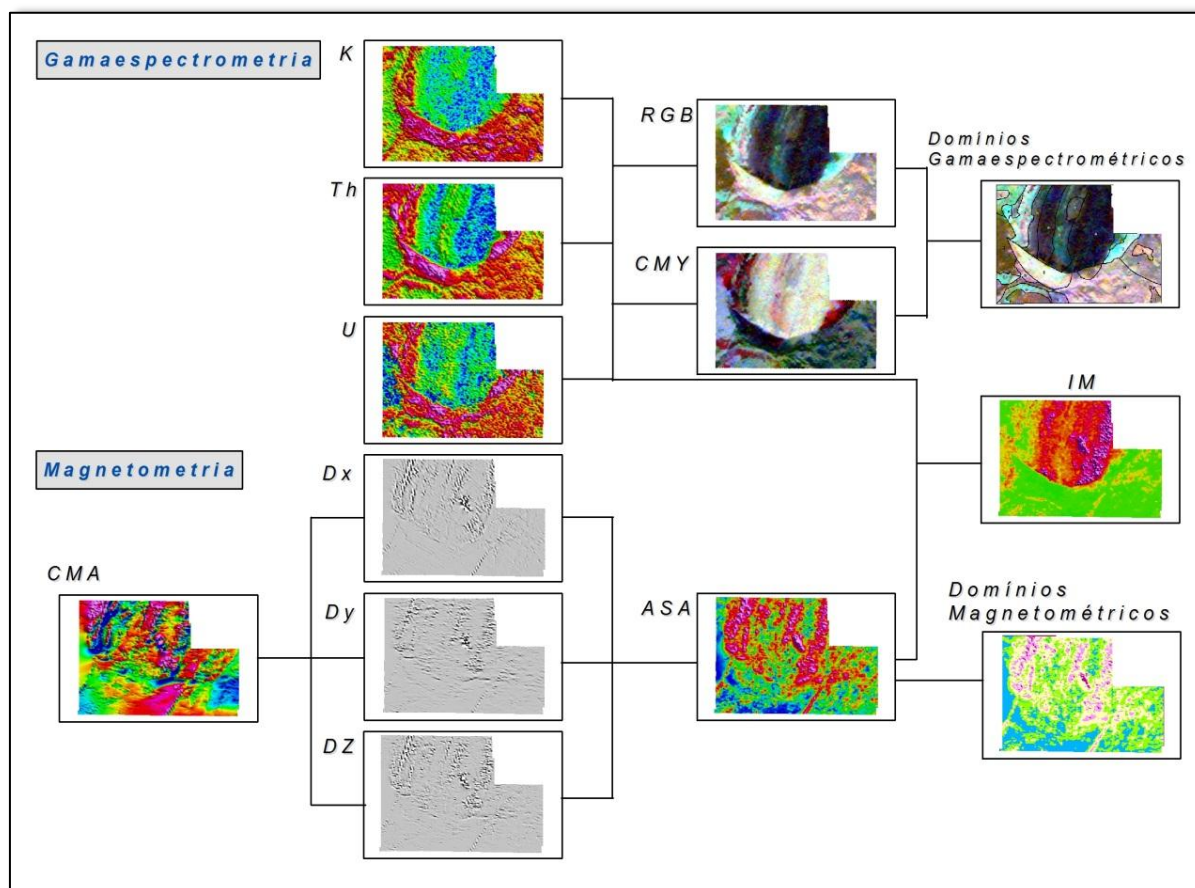


Figura 6 - Fluxo do Processamento dos Dados Aerogeofísicos Aplicados.

Uma classificação visual foi aplicada às imagens ternárias para geração do produto de mapa de domínios gamaespectrométricos, visto que as técnicas não supervisionadas (ISODATA-*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* e Média-K), supervisionadas (MAXVER-máxima verossimilhança) e processo de segmentação não apresentaram bons resultados. A diferença na utilização dos mapas ternários é que o RGB destaca melhor os valores maiores dos elementos e o CMY os valores menores. A classificação foi realizada dessa forma, porque as técnicas de classificações não supervisionada e supervisionada não apresentaram bons resultados.

Com a análise dos dois mapas ternários foi elaborado um mapa que representa a compartimentação dos domínios gamaespectrométricos. A partir deste mapa foi feita uma análise dos domínios levando-se em consideração a geologia, relevo e processos pedogenéticos (intemperismo/erosão).

Para entender melhor a variação do relevo associado aos dos aerogeofísicos (gamaespectrometria) foi gerada uma imagem em 2,5D na área de estudo.

Os valores do Campo Magnético Total (CMT) proveniente da leitura do magnetômetro tem contribuição tanto do magnetismo remanescente das rochas quanto o do núcleo da terrestre. Para geração dos dados do campo magnético anômalo que reflete a variação da susceptibilidade magnética das rochas da região, deve-se retirar, com a utilização por modelos matemáticos, o Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF) Com a retirada do IGRF, o campo resultante o qual representa as anomalias magnéticas situadas na crosta acima da superfície Curie, é denominado de campo magnético anômalo (CMA).

O método bidirecional (bi-grid, Geosoft, 2009) foi o escolhido para a interpolação dos dados de magnetometria, pois resultou no maior detalhamento das anomalias magnéticas, em contraste com um baixo nível de ruídos. A partir do produto Campo Magnético Anômalo (CMA), foram geradas as derivadas horizontais X (Dx) e Y (Dy) e a derivada vertical em Z (Dz).

As Derivadas horizontais Dx e Dy são usadas no intuito de realçar os gradientes horizontais e, por conseguinte, as possíveis fontes das anomalias representadas (filtros passa-alta) (Blum, 1999). O filtro de derivada vertical em Z (Dz) promove a amplificação do comprimento de onda curto em relação aos de comprimento de onda longos, funcionando como um filtro passa-alta.

A Amplitude do Sinal Analítico (ASA) foi gerado por meio das derivadas Dx, Dy e Dz (Roest *et al.*, 1992) utilizando a Equação 1 abaixo:

$$ASA = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

O produto Amplitude do Sinal Analítico (ASA) permite o posicionamento de corpos magnéticos, pois a técnica compreende uma função simétrica em que os picos do sinal analítico

encontram-se centrados nas bordas das anomalias magnéticas segundo Nabighian (1972; 1974) e Roest *et al.* (1992).

A partir do produto ASA foram utilizadas técnicas de classificação supervisionada, que são baseadas no tratamento estatístico dos dados e podem ser aplicados para qualquer tipo de dados e classificações não-supervisionadas ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*) e Média-K para gerar o mapa de domínios magnéticos. A classificação não-supervisionada por Média-K foi escolhida por ser um método de fácil aplicação e que apresentou o melhor resultado com a definição de cinco classes (muito alto, alto, médio, baixo e muito baixo). Esse método calcula inicialmente as classes distribuindo-as em uma classe uniforme no espaço e aglomera classe por classe em um processo iterativo usando a técnica de distância mínima (Tou & Gonzalez, 1974).

O produto **Índice Máfico (IM)** foi gerado por ser uma técnica útil para individualização de corpos de origem máfica e ultramáfica (Pires & Moraes, 2006) (Equação 2). O IM foi utilizado por possibilitar um melhor resultado na delimitação de corpos máfico e ultramáficos, visto que esse elimina a influência de materiais ricos em Fe presentes na superfície do terreno (solos lateríticos). A equação do IM é constituída por variáveis magnética (ASA) e gamaespectrométrica (K, eTh e eU).

$$IM = \frac{ASA}{(K * U * Th)} \quad (\text{Eq. 2})$$

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1. Relevô

Os mapas gerados de hipsometria e de classes de declividade (Figuras 7 e 8) mostraram relevô bastante variado, demonstrando relações com as unidades geológicas e pedológicas.

O mapa hipsométrico apresentou porções mais elevadas na porção leste e oeste do Complexo Máfico-Ultramáfico e na unidade quartzítica do Grupo Serra da Mesa com declividade mais acentuada. Na área onde ocorrem as unidades do Grupo Paraná as classes de declividades e hipsometria são variadas. As classes de declividades com relevô plano a suave ondulado apresentam-se sobre as unidades metapsamo-pelítica do Grupo Serra da Mesa, na Sequência metavulcanossedimentar Indaianópolis, no Complexo do Rio Maranhão e nas coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas.

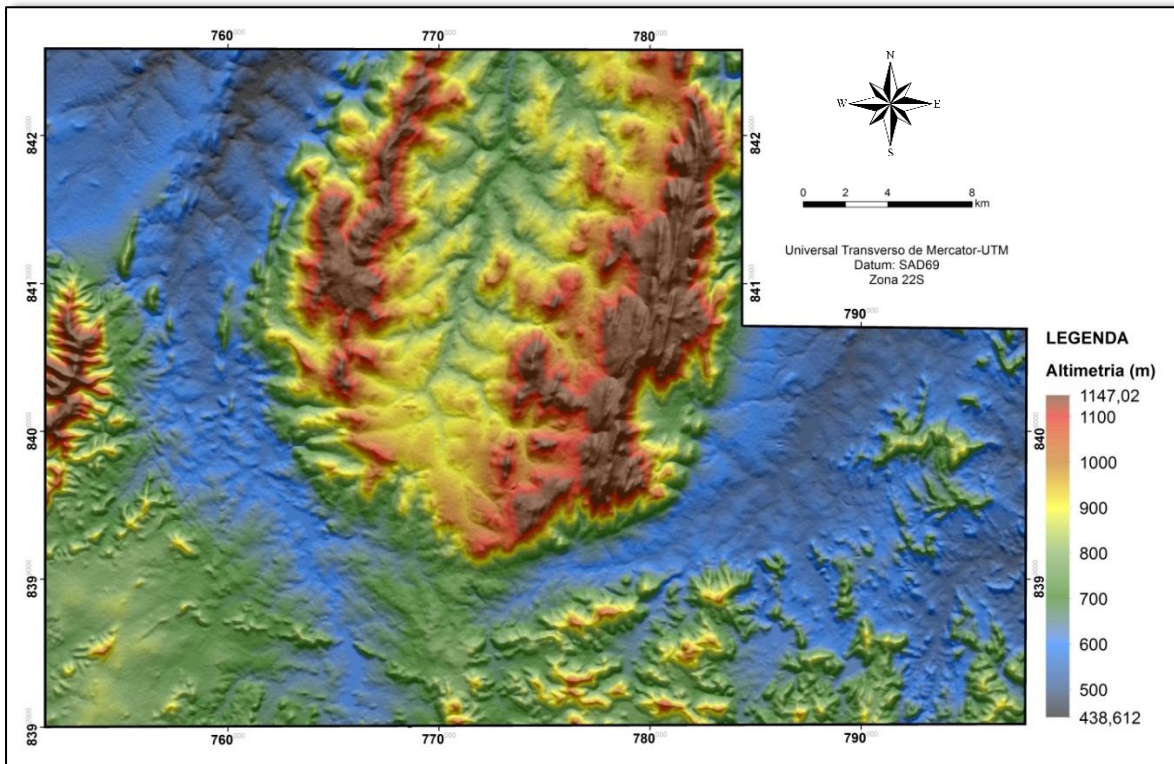


Figura 7- Mapa Hipsométrico da Área de Estudo Extraído do SRTM.

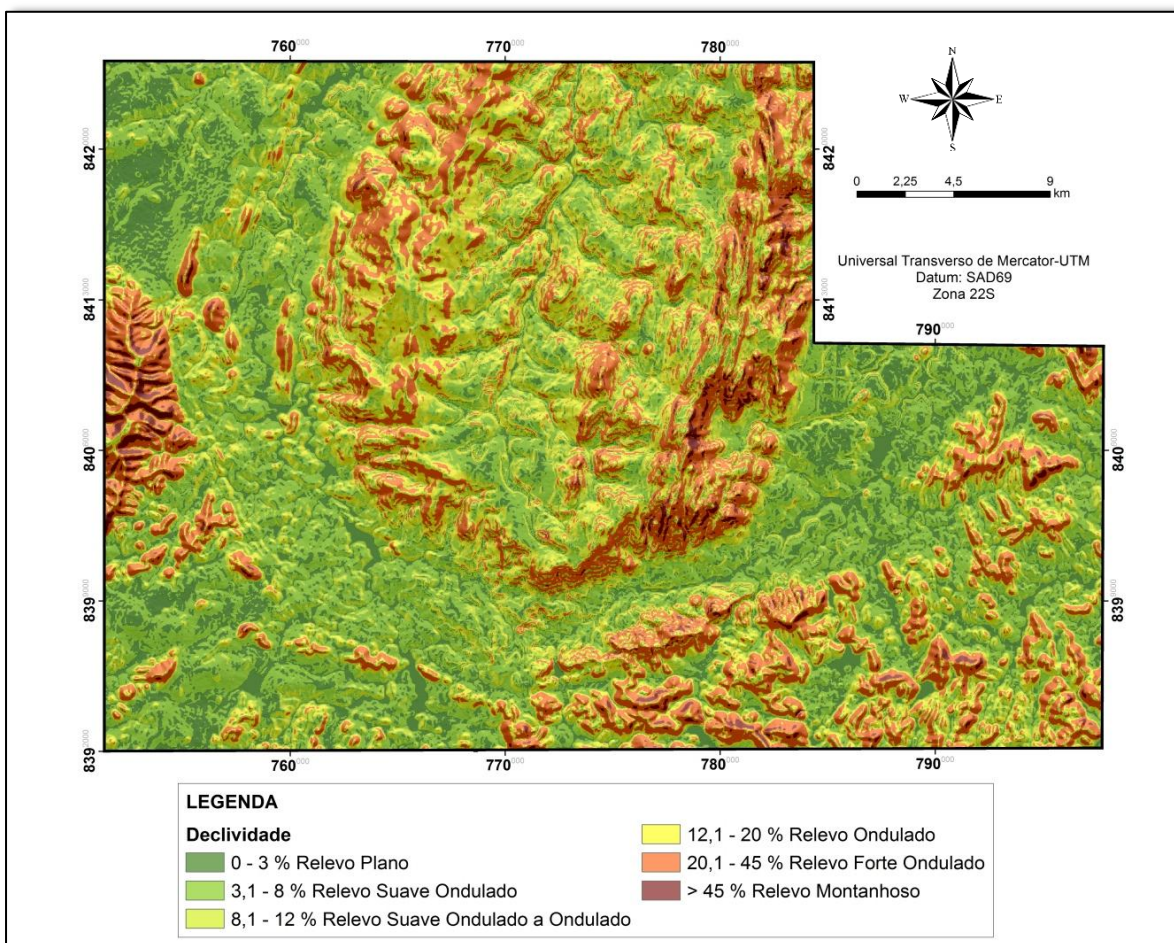


Figura 8 - Mapa de Declividade da Área de Estudo Extraído do SRTM.

No Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, as estruturas geológicas de direção N10E foram evidenciadas nestes mapas, por meio de cristas orientadas e a feição pseudo-dômica (Latrubesse & Carvalho, 2006). Essas cristas são sustentadas pela presença de calcedônia no topo. Destaca-se a expressão geomorfológica arrasada em volta do Complexo Máfico-Ultramáfico, com algumas variações nas classes de declividade nas rochas quartzíticas pertencente ao Grupo Serra da Mesa e pelitos-carbonatados do Grupo Paranoá. As unidades adjacentes apresentam variações geomorfológicas tais como: as Superfícies Regionais de Aplainamento (SRAIII), Zona de Erosão Recuante (ZER), Morros e Colinas (MC) e Estruturas Dobradas formando Hogbacks (HB).

2.4.2. Gamaespectrometria

A gamaespectrometria mapeia as variações nas concentrações dos elementos potássio, urânio e tório. A radiação dos raios gama emitida reflete a composição química da rocha e do solo sobrejacente somente para os três elementos considerados (Wilford *et al.*, 2001). Portanto, nas áreas que ocorrem processos erosivos a abundância de radioelementos reflete a geoquímica e a mineralogia das rochas, enquanto que nas áreas aplainadas a resposta é modificada em função dos processos de pedogênese.

Os mapas gerados dos canais de K(%) (Figura 9), eTh (ppm) (Figura 10) e eU (ppm) (Figura 11) foram utilizados para interpretação dos dados gamaespectrométricos, além dos mapas de combinação ternária de composição RGB e CMY para K, eTh e eU, respectivamente.

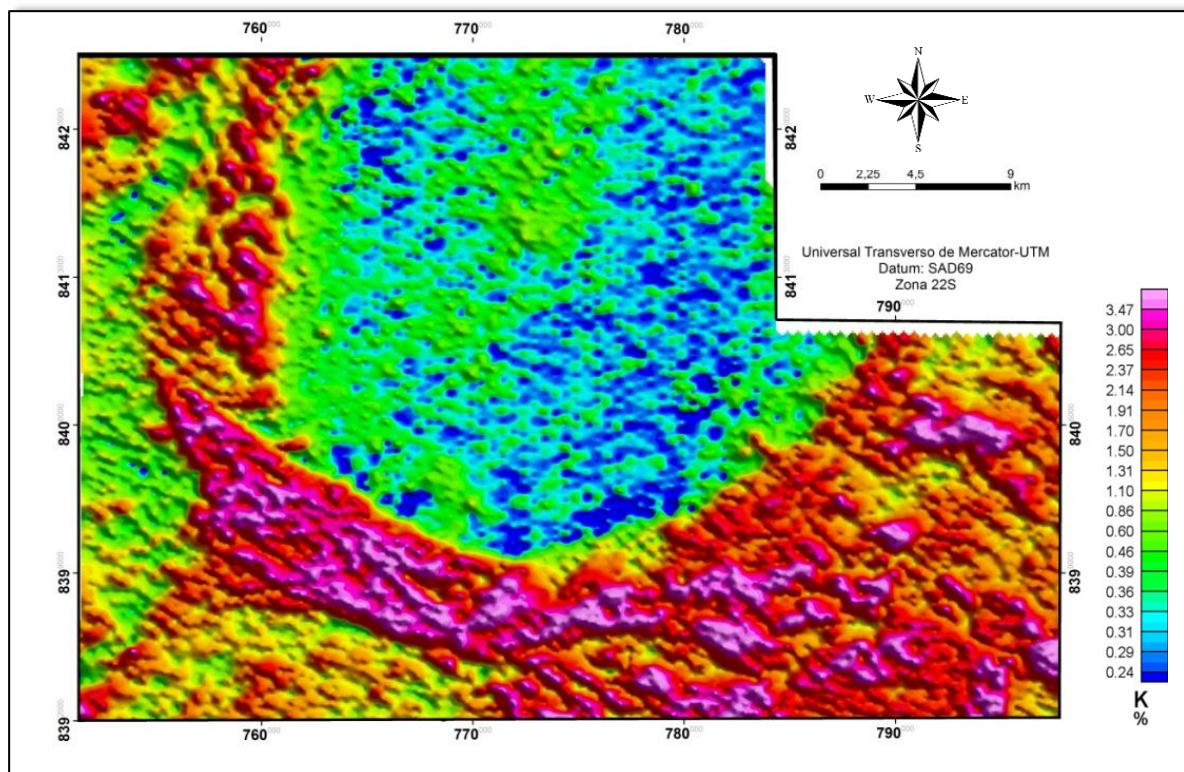


Figura 9 - Mapa do Canal de Potássio.

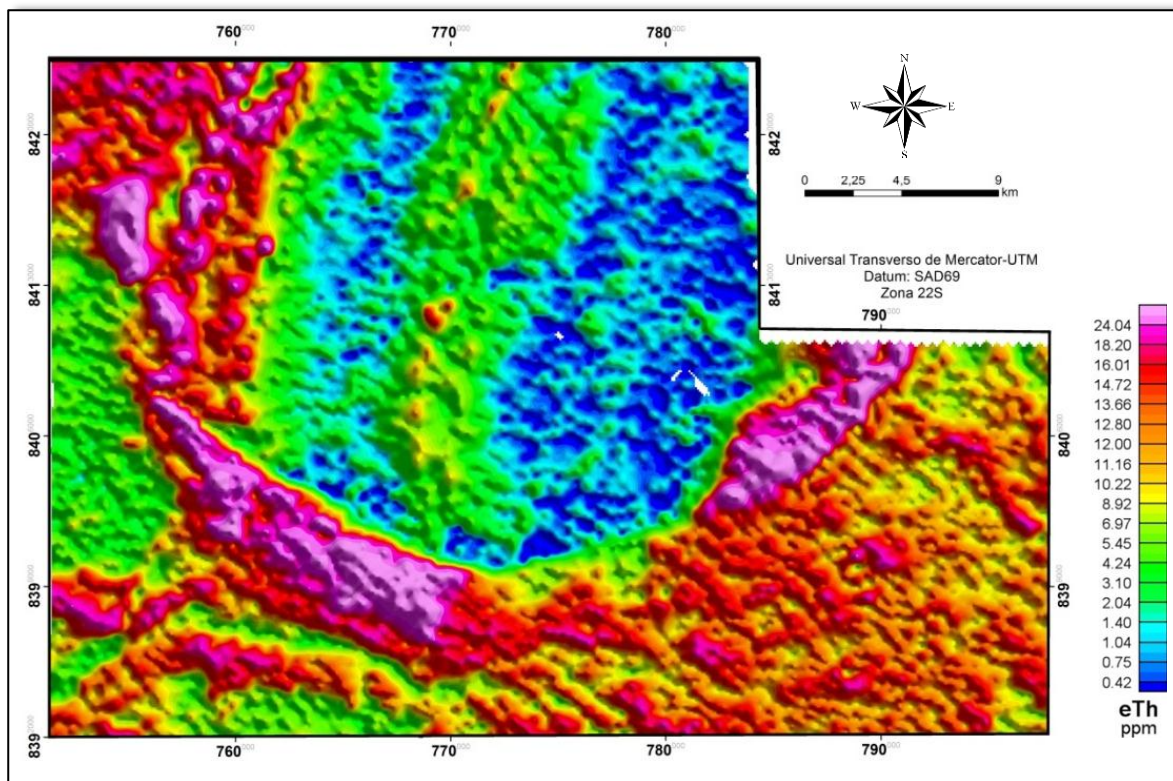


Figura 10 - Mapa do Canal de Tório.

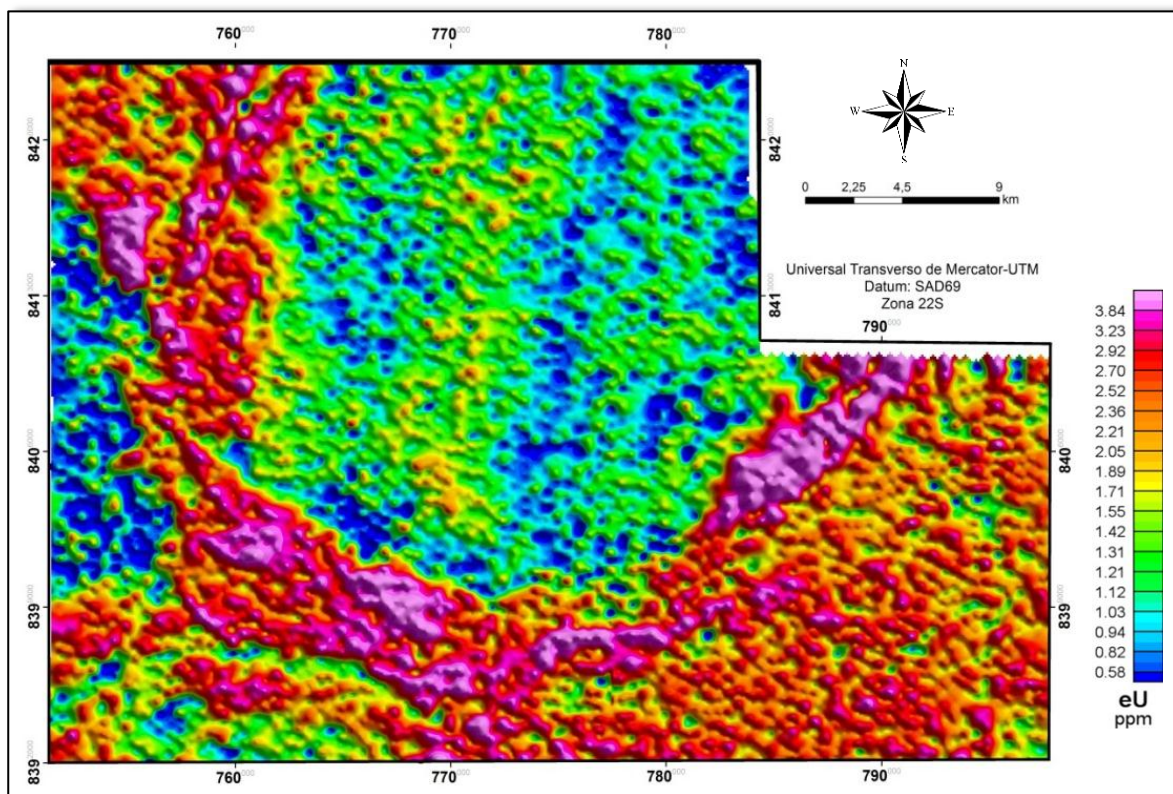


Figura 11 - Mapa do Canal de Urânio.

A influência da geomorfologia pode ser observada nas variações dos domínios aerogeofísicos apresentado na imagem em 2,5D na área de estudo (Figura 12).

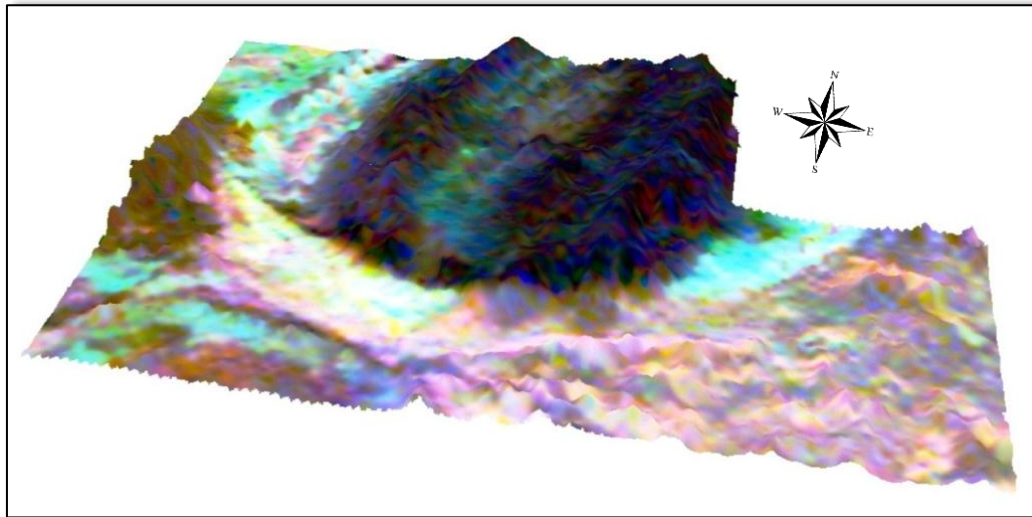


Figura 12 - Imagem Gamaespectrometria associado ao Modelo Digital de Terreno (2,5D).

A imagem gamaespectrometria associadas ao Modelo Digital de Terreno (MDT) propiciou uma melhor análise e interpretação da distribuição dos teores de K, eTh e eU em relação a forma do relevo (Wilfort *et al.*, 1997) e contribuiu na análise e definições dos domínios gamaespectrométricos.

Para a avaliação da correlação dos dados gamaespectrométricos, geologia, relevo e solos foi utilizado o mapa que representa a compartimentação dos domínios gamaespectrométricos, gerado pela análise dos mapas ternários RGB e CMY (Figura 13).

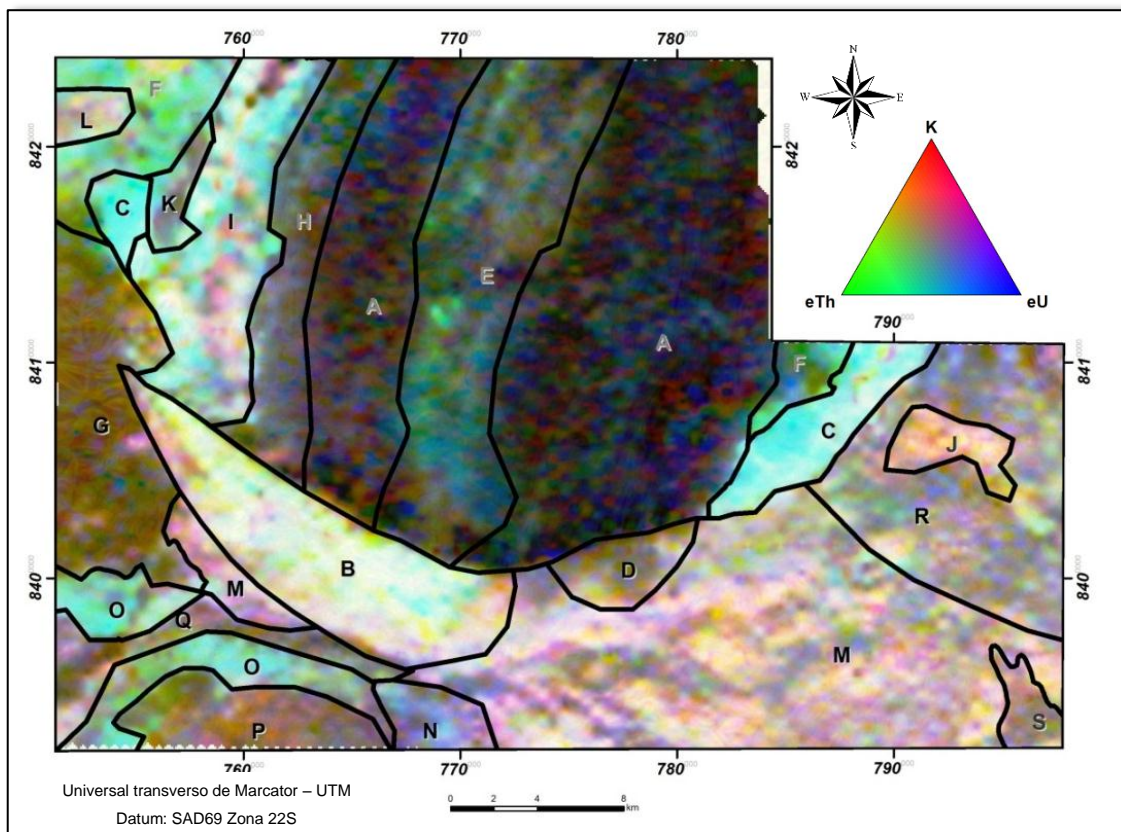


Figura 13 - Domínios Gamaespectrométricos (A a S) interpretados a partir das Imagens Ternárias em RGB e CMY, e canais de K (%), eTh, eU e integrado ao Modelo Digital do Terreno- SRTM.

O mapa de domínios gamaespectrométricos (Figura 13), mostra dezenove domínios gamaespectrométricos individualizados e denominados de A a S e sua correlação com geologia, declividade e unidades geomorfológicas encontram-se na Tabela 2 abaixo:

Tabela. 2 - Caracterização dos domínios gamespectrométricos.

Domínio	Gamaespectrometria	Geologia	Declividade	Geomorfologia
A	Teores extremamente baixos K, eU e eTh	Complexo Máfico-Ultramáfico Niquelândia	Variado de plano a forte ondulado	Pseudo-domo
B	Teores extremamente altos K, eU e eTh	Complexo Rio Maranhão – Granito-gnaiss	Variado de plano a suave ondulado	SRAIII
C	Teores altos de eU e eTh e baixos de K	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e Grupo Serra da Mesa –Xistos	Plano à suave ondulado	SRAIII
D	Teores moderados de eTh e K e baixos de eU	Complexo Rio Maranhão - Granito-gnaiss	Plano à ondulado	Pseudo-domo e SRAIII
E	Teores moderados a altos eTh e eU e baixos a muito baixos K	Complexo Máfico-Ultramáfico Niquelândia - Gabronorito	Plano a suave ondulado. Localmente ondulado a forte ondulado	Pseudo-domo
F	Teores altos a muito altos para eTh, altos eU e moderados a alto K	Grupo Serra da Mesa – Xistos e coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	Plano a suave ondulado	SRAIII.
G	Teores baixos eTh e K e muito baixos eU	Grupo Serra da Mesa - Quartzito	Forte ondulado a montanhoso	MC
H	Teores baixos a moderados eTh e K e baixos a muito baixos eU	SVS Indaianópolis-Unidade Inferior e Unidade Serra dos Borges	Ondulado à muito ondulado	Pseudo-domo
I	Teores altos K, eU e eTh por vezes o canal de K é superior aos demais	SVS Indaianópolis - Unidade Inferior e Superior	Plano a suave ondulado	SRAIIIA
J	Teores altos de K e eTh e moderados de eU	Grupo Paranoá- Rítmica Pelito Carbonatada	Ondulado a forte ondulado	ZER-SRAIIIA
K	Teores muito baixos K e eTh e eU	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e SVS Indaianópolis - Unidade Superior –Riolito e xisto	Plano a ondulado	SRAIII e (HB-ED).
L	Teores altos a muito altos K, altos para U e Th	Grupo Serra da Mesa –xistos e coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	Plano a suave ondulado	SRAIIIA
M	Teores altos a médios K, eU e eTh	Grupo Paranoá- Rítmica Pelito Carbonatada.	Plano a forte ondulado	ZERSRAIIIA

Continuação

N	Teores altos de eU e eTh e médios de K	Grupo Paranoá- Rítmica Pelito Carbonatada	Ondulado a forte ondulado	SRAIIA e ZER-SRAIIIA
O	Teores alto para o eTh e eU moderado para o K	Grupo Paranoá Rítmica Pelito-carbonatado	Plano o suave ondulado	SRAIII.
P	Teores altos de K e moderados a baixos de eTh e baixos de eU	Grupo Paranoá-Rítmica Pelito Carbonatado	Plano a suave ondulado. Pontualmente ondulado	SRAIIIA e a MC
Q	Teores altos de K e eU e moderados de eTh	Grupo Paranoá- Rítmica Pelito Carbonatado	Plano a suave ondulado	SRAIIA e ZER-SRAIIIA
R	Teores altos de K e eTh e moderados a altos de eU	Grupo Paranoá- Rítmica Pelito Carbonatado	Suave ondulado. Forte ondulado localmente	SRAIIA e ZER-SRAIIIA
S	Teores moderados de K e eTh e baixos de eU	Grupo Paranoá- Rítmica Pelito Carbonatado- Metacalcario	Ondulado a forte ondulado	SRAIIA e ZER-SRAIIIA

O domínio **A** mostra uma boa correlação espacial da área mapeada com as rochas ferromagnesianas que são pobres nos radioelementos avaliados. O relevo é acidentado, com ocorrência de cristas alongadas preservadas devido à presença de calcedônia no topo das mesmas, o que proporciona variação nos processos pedogenéticos. Presença de vales suspensos formados sobre piroxenitos e balizados por colinas de dunitos (Carvalho Júnior *et al.*, 2004) observados na Zona Ultramáfica do Complexo de Niquelândia. Em função da variação geomorfológica, podem ocorrer várias classes de solos, tais como: Latossolos, Solos de horizonte B textural, Cambissolos e Neossolos. As rochas máficas, devido a sua química-mineral, exibem baixas concentrações em valores dos radioelementos (Carvalho, 2006). Segundo Dickson & Scott (1997), os basaltos mostram concentrações maiores que aquelas apresentadas em dunitos e peridotitos.

O domínio **B** localiza-se no Complexo Rio Maranhão, constituído por granito-gnaisses, que representam litologias com valores altos de K, eU e eTh, decorrentes da geoquímica e da mineralogia dessas rochas (Ulbrich *et al.*, 2009). Já o domínio **D**, que localiza-se na transição do Complexo Rio Maranhão com a Zona Máfica do Complexo de Niquelândia, apresenta valores mais baixos de K, eU e eTh, como consequência da composição geoquímica das rochas básicas.

O domínio **C** apresenta processos pedogenéticos mais acentuados, em função da declividade mais baixa, proporcionando a formação de Latossolos Vermelhos, enriquecidos em óxidos e hidróxidos de ferro. Os radioelementos eU e o eTh apresentaram teores altos, pois quando liberados durante o intemperismo, tendem rapidamente a serem adsorvidos nos minerais de argila e co-precipitados com óxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.*, 1997).

O domínio **E** está em relevo mais baixo e exhibe uma variação mais alta nas concentrações de eTh e eU. Isto pode ser explicado devido à pequena variação da declividade e ao processo pedogenético mais atuante, não apenas na rocha gabronorito de origem, mas também em material

coluvionar. Tanto no material de origem quanto nos processos pedogenéticos ocorrem a perda do elemento K devido ao aumento de solubilidade.

O domínio **F** apresenta altos valores nas concentrações de eTh e eU, associados aos óxidos e hidróxidos de ferro (Wilford *et al.*, 1997) nas rochas xistosas e coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, estas últimas, particularmente, presente na porção leste do Complexo.

O Domínio **G** exibe baixas concentrações dos radioelementos por apresentar uma mineralogia rica em sílica devido à presença de quartzitos em relevo muito acidentado. Essas rochas ricas em quartzo podem ser identificadas a partir das baixas concentrações dos radioelementos, associação também utilizada para mapear solos arenosos (Wilford *et al.*, 1997).

O domínio **H** está localizado no extremo oeste do Complexo de Niquelândia. Ocorrem litologias pobres no elemento K, justificando seus baixos teores. O relevo com variações na declividade, com predomínio de processos de erosão em relação à pedogênese, justifica baixas concentrações de eU e eTh.

No domínio **I**, os altos valores nas concentrações dos radioelementos estão associados às presenças de gnaisses e riolito da Sequência metavulcanossedimentar Indaianópolis. Já o domínio **L** mostra correlação espacial com xisto carbonático e mica xisto que constituem a Unidade B do Grupo Serra da Mesa.

Os domínios **J, M, N, O, P, Q e R**, presentes em rochas da Unidade Pelito-Carbonatada do Grupo Paranoá, apresentaram variações nas concentrações de K, eTh e eU. Isto pode ser devido à variação nas classes de declividade e no relevo, proporcionando processos de formação de solos variados ou maior exposição da rocha.

O domínio **S**, localizado na unidade Pelito Carbonatada - Metacalcário do Grupo Paranoá apresenta relevo ondulado ou fortemente ondulado, portanto, com maior influência do material de origem. Apresenta-se na unidade geomorfológica Zona de Erosão Recuante com dissecação muito forte, relacionada à geração da subunidade SRA-III A.

Os resultados obtidos da interpretação dos domínios gamaespectométricos foram embasada nas concentrações de K, eU e eTh, relacionadas ao conjunto de fatores decorrentes da geoquímica das rochas, tipo de relevo e atuação de processos pedogenéticos.

Nos processos intempéricos o radioelemento K é geoquimicamente móvel, e está presente nos feldspatos potássicos, micas, e argilo-minerais tais como a illita e a montmorilonita e em menores proporções na caulinita (Wilford *et al.*, 1997), assim, tendem a se concentrar em solos jovens derivados de rochas félsicas observadas no Complexo Rio Maranhão e Sequência metavulcanossedimentar Indaianópolis. Segundo Dickson & Scott (1997), o potássio está praticamente ausente em minerais máficos, por isso em rochas máficas e ultramáficas não são observados teores radiométricos elevados no Complexo de Niquelândia.

Já o eU e eTh apresentam menor mobilidade em relação ao K. Em rochas graníticas ou metamórficas, os solos apresentam teores variáveis de K, eTh e eU (Boyle, 1982). Nos solos os teores de eU e eTh são dependentes de seu material de origem, ou seja, os valores são maiores quando oriundos de rochas graníticas, rochas ígneas alcalinas, xistos e gnaisses, e os teores mais baixos quando provenientes de rochas ígneas básicas e rochas carbonáticas. O urânio e o tório, quando liberados durante o intemperismo, são adsorvidos nos minerais de argila ou co-precipitados com óxidos e hidróxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.*, 1997), estes últimos são concentrados em solos mais evoluídos, desenvolvidos em relevo com declividade plana a suave ondulada. Estes resultados foram observados na área de estudo, principalmente, onde apresentam-se as coberturas detrito-lateríticas ferruginosas.

A pedogênese, então, é um fenômeno importante na identificação e na distribuição dos radioelementos na superfície, uma vez que os teores de urânio e tório nos solos são altamente variáveis. Portanto, uma análise de dados gamaespectrométricos tem que levar em consideração todo o contexto físico da área de estudo não apenas a geologia, mas também o relevo e todos os processos pedogenéticos atuantes na formação do solo.

2.4.3. Magnetometria

A utilização da magnetometria tem como objetivo a discriminação dos litotipos com base na susceptibilidade magnética e a observação de possíveis feições magnética que apresentem em superfície associação com lineamentos estruturais. A análise do dado magnetométrico foi realizada a partir da classificação dos domínios magnéticos para uma melhor discriminação da assinatura magnética do Complexo de Niquelândia e regiões adjacentes com base no produto Amplitude do Sinal Analítico – ASA (Figura 14).

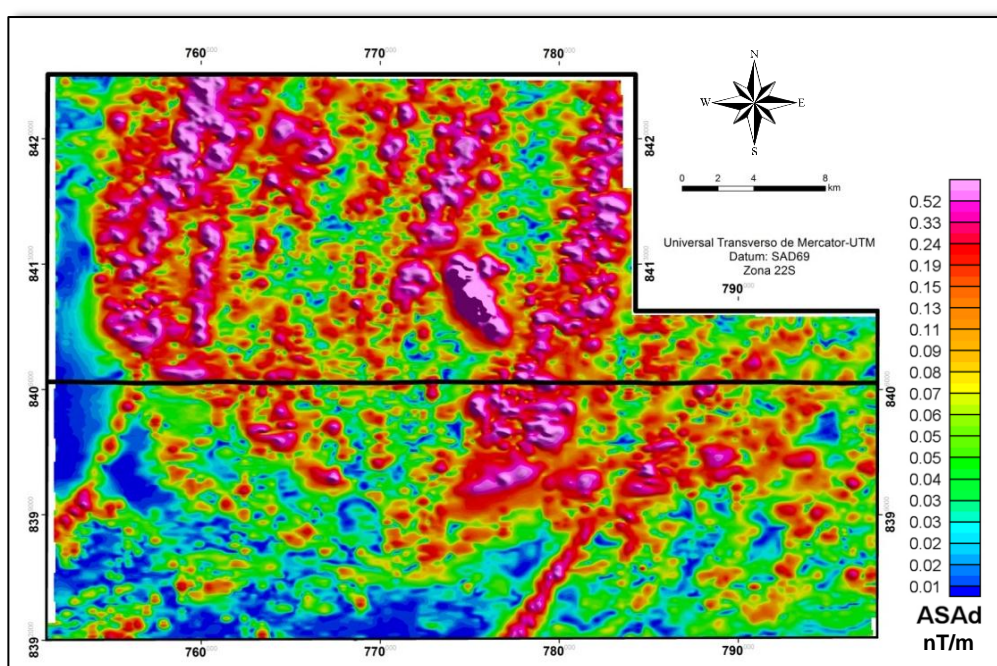


Figura 14 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico.

No contexto geral, os domínios magnéticos (Figura 15) apresentam valores de intensidade do campo magnético variando de médio a muito baixo, estando associados às rochas sedimentares dos Grupos Paranoá e Serra da Mesa.

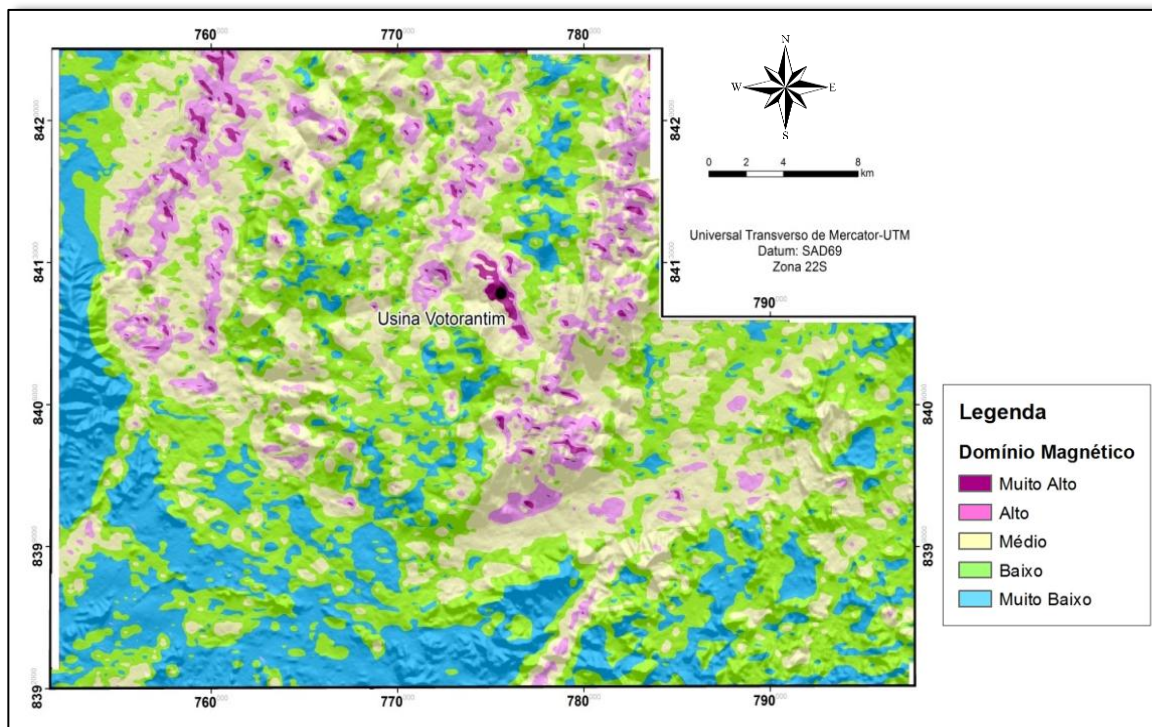


Figura 15 - Domínios Magnético com utilização Amplitude do Sinal Analítico – ASA.

Os domínios magnéticos altos a muito altos ocorrem em algumas porções do Complexo de Niquelândia, principalmente, na zona ultramáfica e na Sequência metavulcanossedimentar Indaianópolis. Observam-se também altos magnéticos na porção leste da área de estudo podendo ter sido influenciados por solos mais ricos em óxidos e hidróxidos de ferro. Na porção leste do Complexo, observa-se em destaque uma feição anômala com valores de intensidade do campo magnético alto, que em superfície representa a usina de níquel da empresa Votorantim. Na porção centro sul e oeste, ocorrem feições lineares magnéticas de direção NE, marcantes em toda área.

2.4.4. Índice Máfico

A partir da análise dos dados aéreos de gamaespectrometria e magnetometria foi calculado o Índice Máfico (IM), que resulta da combinação desses dois dados (Figura 16). Esse produto possibilita a eliminação de influências promovidas por solos ricos em ferro, salientando as assinaturas das fontes magnéticas originada pelo substrato litológico. O produto IM da área do Complexo de Niquelândia possibilitou discriminar as feições magnéticas geradas pelas rochas fontes que deram origem aos solos presentes.

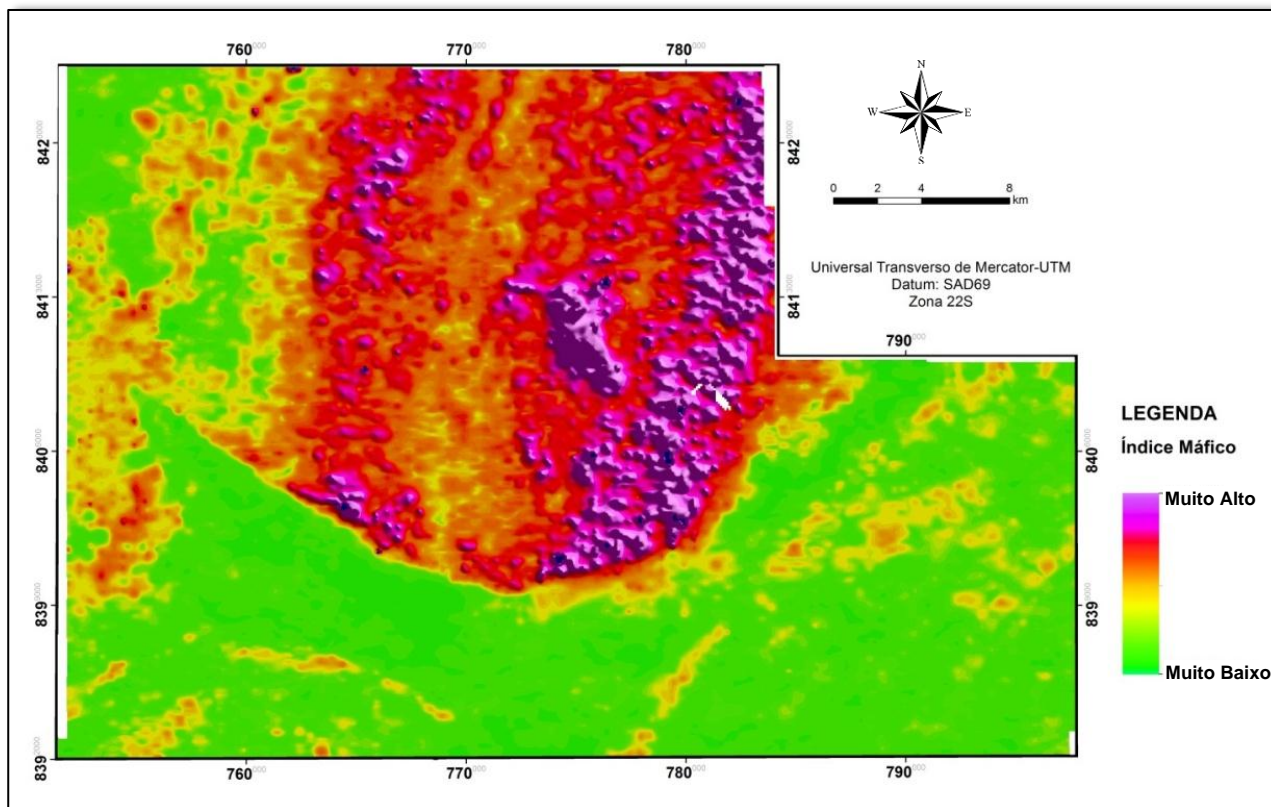


Figura 16 - Mapa do Índice Máfico da área de estudo.

O Índice Máfico (IM) permitiu individualizar as feições com intensidade do campo magnético alto (coloração magenta e vermelha) relacionado à presença de rochas máficas e ultramáficas, que compreendem as Sequências Magmática Inferior e Magmática Superior do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e com maior destaque para a Zona Ultramáfica. O Complexo foi delimitado em relação às unidades adjacentes (coloração verde e amarelo), correspondentes às rochas do Complexo Rio Maranhão, da Sequência metaulcanossedimentar de Indaianópolis e metassedimentares dos Grupos Paranoá e Serra da Mesa. As áreas que apresentaram intensidade do campo magnético alto no produto ASA e foram eliminadas no IM, provavelmente, devido à fonte causadora ser de origem mais superficial como os solos ricos em ferro.

2.4.5. Perfis da Integração de Dados Geofísicos, Litológicos e Hipsométricos

O empilhamento dos perfis dos dados aerogeofísicos e hipsométrico associados à geologia permitiu uma visualização integrada e foram úteis na interpretação das relações destes. Os perfis foram realizados ao longo de uma linha de controle do voo aerogeofísico, com direção W-E transversal ao *trend* das litologias do Complexo de Niquelândia, situado na porção central da área estudada. A localização da linha de controle que foram gerados os perfis encontra-se no Mapa de Amplitude Analítica (Figura 14).

Os perfis com as concentrações de K, eU e eTh e o Campo Magnético Anômalo - CMA são apresentados juntos as unidades litológicas e dado hipsométrico (Figura 17).

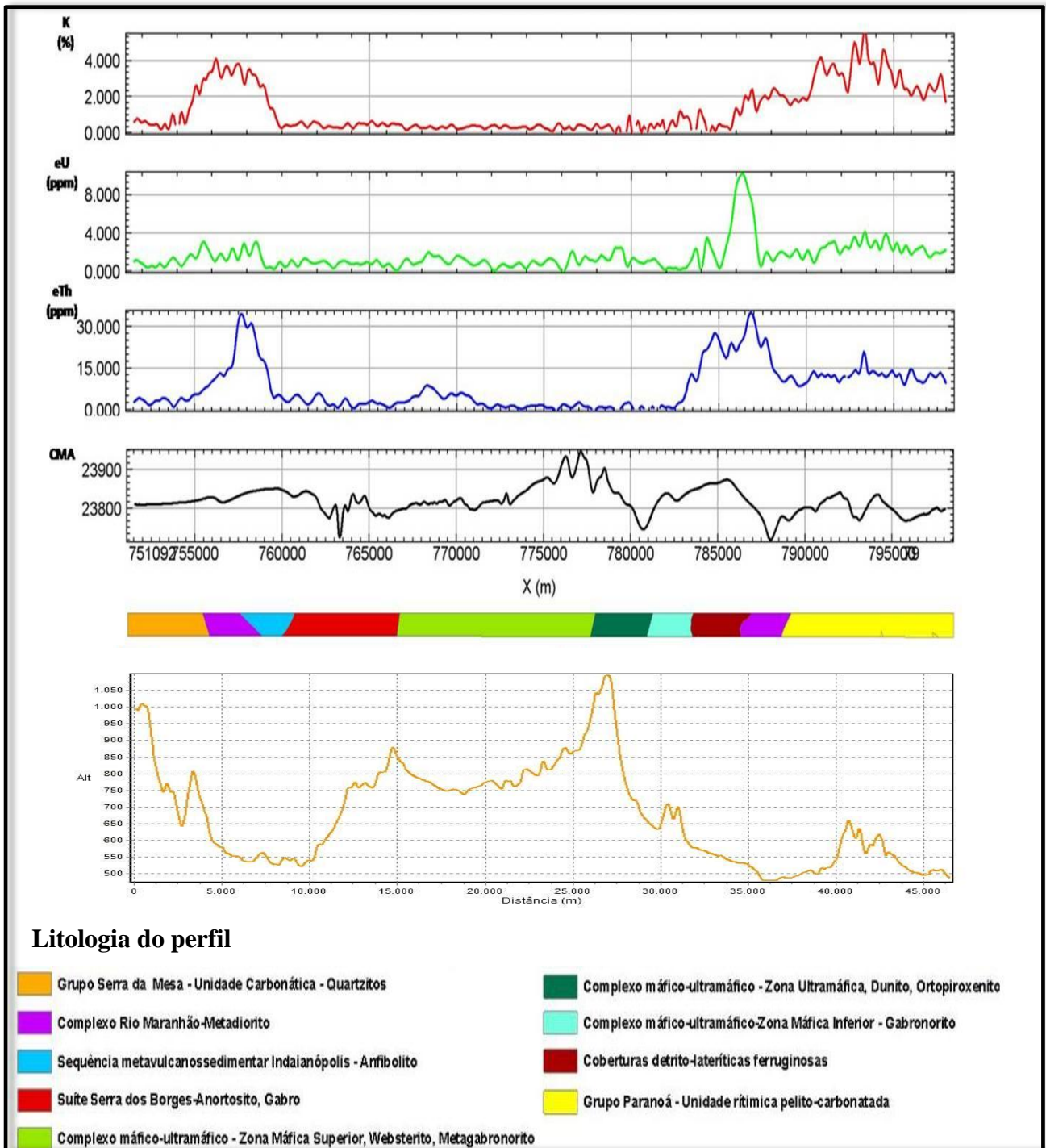


Figura 17 - Perfis da linha de controle do K, eU, eTh, CMA, litologia e relevo (direção W-E).

A avaliação conjunta dos perfis evidência a influência das litologias e do relevo, representado pela hipsometria, sobre os dados aerogeofísicos. O Grupo Serra da Mesa de composição quartzítica mostra valores variando de baixo a muito baixo para os radioelementos e para o CMA com relevo fortemente ondulado. O Complexo Rio Maranhão apresenta valores com concentrações mais altas para K e médias para eTh e eU, e localiza-se em relevo mais plano. A Sequência Vulcano-sedimentar Indaianópolis inferior apresentou concentrações altas de K e eTh e baixas de eU e relevo mais plano. Os valores de intensidade do campo magnético se mantiveram entre médio a baixo nessas duas unidades litológicas. No Complexo Máfico-Ultramáfico de

Niquelândia as concentrações de K, eU e eTh apresentaram valores muito baixos, no entanto, verificou-se um discreto aumento nas concentrações de eTh. Já os maiores valores de intensidade do campo magnético ocorreram entre as unidades Máfica Superior e Ultramáfica, onde o relevo apresentou-se bastante variado. As coberturas detrito-lateríticas ferruginosas apresentaram concentrações altas de eTh e eU e baixas de K e valores médios a altos de intensidade do campo magnético e relevo mais plano. O Grupo Paranoá mostra concentrações altas para K, médias para eTh e médias a baixas para eU. Os valores de intensidade do campo magnético foram variados, de médios a muito baixos, em relevo com declividade variada.

2.5. CONCLUSÕES

A geração do mapa de domínios gamaespectrométricos possibilitou avaliar a variação dos dados e diferenciar as unidades geológicas máficas-ultramáficas do Complexo de Niquelândia, das litologias da Sequência Vulcano Sedimentar de Indaianópolis e das litologias predominantemente granito-gnássicas e sedimentares do Complexo Rio Maranhão, Grupo Paranoá e Grupo Serra da Mesa. Dentro destas unidades geológicas, verificou-se variações nos teores de K, eU e eTh em função de sua correlação com a geologia, relevo e classes de solo, o que levou a individualização de dezenove domínios gamaespectrométricos.

Os domínios gamaespectrométricos constituídos por rochas máficas e ultramáficas do Complexo de Niquelândia, ocorrem predominantemente em áreas de relevo acidentado e com formação de solos pouco evoluídos, mostrando respostas gamaespectrométricas claramente opostas àquelas dos domínios compostos por rochas félsicas, ricas em radioelementos, como do Complexo Rio Maranhão, Grupo Paranoá e Grupo Serra da Mesa. Nas áreas do Complexo de Niquelândia onde o relevo é mais suave e com declividade que caracterizam o relevo como plano a suave ondulado, observou-se perda de K e a concentração de eU e eTh, em decorrência dos processos intempéricos.

Os domínios gamaespectrométricos com predominância de coberturas pedológicas mostraram teores mais altos de eU e eTh e mais baixos de K, em função da grande mobilidade deste último e co-precipitação do eU e eTh com óxidos e hidróxidos de Fe e Al em ambiente pedogenético.

A partir do mapa de Amplitude de Sinal Analítico, realizou-se a interpretação dos dados magnetométricos, sendo separados cinco domínios magnetométricos, demonstrando a variabilidade litológica da região estudada. Salientou porções de composição máfica-ultramáfica, particularmente nas unidades do Complexo de Niquelândia e da Sequência Vulcano Sedimentar de Indaianópolis. As porções com presença predominante de rochas granito-gnássicas e sedimentares do Complexo Rio Maranhão, Grupo Paranoá e Grupo Serra da Mesa mostraram baixos magnéticos.

O processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos através do Índice Máfico permitiu individualizar o Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia de suas unidades

adjacentes, além de destacar o corpo constituído por rochas ultramáficas. Tal resultado mostrou a eficiência do Índice Máfico na discriminação de rochas máfica-ultramáfica, visto que ele elimina a resposta magnética superficial decorrente de rochas alteradas e solos, e ressalta a resposta magnética da rocha subjacente.

A correlação de dados aerogeofísicos gamaespectrométricos e magnetométricos, associados à composição geoquímica das rochas, as feições do relevo, os solos e os processos pedogenéticos permitiu a individualização do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia de suas unidades adjacentes.

2.6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA L, RESENDE L, RODRIGUES AP & CAMPOS, JEG. 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás. Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. Goiânia, 232p.

BLUM MLB. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. 1999. 229 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 1999.

BOYLE RW. 1982. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. *Developments in Econ. Geol.*, 16: 71-78.

BRITO NEVES BB, VAN SCHMUS WR, SANTOS EJ, CAMPOS NETO MC & KOZUCH M. 1995. O evento Carirís Velhos na província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas: *Rev. Bras. Geoc.*, 25: 279-296.

CARRINO TA, SOUZA FILHO CR & LEITE EP. 2007. Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra leste, província mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geof.* 25(3): 307-320.

CARVALHO JÚNIOR OA, MARTINS ES, CARVALHO APF, MENESES PR, GOMES RAT & CARDOSO FBF. 2004. Estimativa da abundância de minerais do depósito de níquel Laterítico da mina fazenda por espectrorradiometria *Rev. Bras. Geoc.*, 23(1): 39-50.

CARVALHO LMM. 2006. Integração de dados de geofísica aérea aplicada a geologia e a prospecção mineral no Distrito Esmeraldífero de Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese (doutorado em geologia), Pós-graduação em geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília 2006. 178 p.

CORREIA CT, GIRARDI VAV, LAMBERT DD, KINNY PD & REEVES SJ. 1996. ²Ga U-Pb (SHRIMP-II) and Re-Os ages for the Niquelândia Basic-Ultrabasic Layered Intrusion, Central Goiás, Brazil. In: Congresso Brasileiro Geologia, 39. 1996. Salvador. Anais....Salvador, SBG.1996, 6: 187-189.

- CORREIA CT, GIRARDI VAV, TASSINARI CCG & JOST H. 1997. Rb-Sr And Sm-Nd Geochronology Of The Cana Brava Layered Mafic-Ultramafic Intrusion, Brazil, And Considerations Regarding Its Tectonic Evolution, *Rev. Bras. Geoc.* 27(2): 163-168.
- CORREIA CT; JOST H, TASSINARI CCG, GIRARDI VAV & KINNY PD. 1999. Ectasian Mesoproterozoic U-Pb ages (SHRIMP II) for the metavolcano-sedimentary sequences of Juscelândia and Indaianópolis and for the high grade, metamorphosed rocks of the Barro Alto stratiform igneous complex, Goiás State, Central Brazil. *In: South American Symposium on Isotopic Geology*, 2, 1999, Argentina. *Actas...Cordoba*, 1999, 31-33.
- DANNI JCM & LEONARDOS OH. 1978. As sequências granulítica, anortosítica-anfibolítica-ultramáfica da região de Niquelândia-GO. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30. 1978. Recife. *Resumos...Recife*, SBG. Bol. 1: 45.
- DANNI JCM & LEONARDOS OH. 1980. Granulite metamorphism and deformation in ancient composite layered intrusions: The Niquelândia Complex, Brazil. *In: XXVI International Geologique Congres.* 1, Paris, Abstracts...Paris, 35.
- DANNI JCM, FUCHS RA & LEONARDOS OH; 1982. Archean and Lower Proterozoic Units In Central Brazil. *Geol Rundschau.* 71(1): 291-317.
- DARDENNE MA. 1978. Zonação tectônica da borda ocidental do craton do São Francisco. *In: Congresso Brasileiro Geologia*, 30, Recife, 1978, *Anais... Recife*, SBG. 1: 299-308.
- DARDENNE MA. 2000. The Brasília fold belt. *In: CORDANI U.G., MILANI E.J., THOMAZ FILHO A.; CAMPOS D.A (eds.) Tectonic Evolution of South America.* Rio de Janeiro, DNPM, p. 231-263
- DARDENNE MA & FARIA A. 1985. Estratigrafia do Grupo Paranoá na região de Alto Paraíso – GO. *In: Simpósio Geologia Centro-Oeste*, 2. *Anais ... Goiânia*, SBG. 65-71.
- DICKSON BL & SCOTT KM. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Jour. Austr. Geol. Geoph.*, Austrália, 17(2):1 87-200.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. Inc., 380 New York Street, Redlands, CA 92373 USA.
- FARIA A & DARDENNE MA. 1995. Estratigrafia do Grupo Paranoá na região Alto Paraíso de Goiás-São João da Aliança. *In: Simposio de Geologia do Centro-Oeste*, 5, Goiânia,1995. *Anais....Goiânia*, SBG. Núcleos Centro-Oeste e Brasília, 75-76.
- FERREIRA FILHO CF & NALDRETT AJ. 1993. The Niquelândia mafic-ultramafic complex revisited: tectonic setting and potential for PGE deposits. *In: Brazilian PGE Meeting*, 1, Brasília, 1993, *Extended Abstract*, Brasília, SBG, 25-28.
- FERREIRA FILHO CF & PIMENTEL MM. 1999. Sm-Nd Isotop Systematic and Ree-Hf- Ta-Th Data for Mafic Rocks of the Niquelândia Complex Upper Layered Series, Central Brazil: Further

Constraints for the Timing of Magmatism And High Grade Metamorphism. In: II South American Symposium Isotope Geology, Cordoba, Argentina, 1999. Actas.....1: 60-62.

FERREIRA FILHO CF, NILSON AA & NALDRETT AJ. 1992. The Niquelândia Mafic-Ultramafic Complex, Goiás, Brazil: a contribution to the ophiolite X stratiform controversy based on new geological and structural data. *Precamb. Resea.*, 59: 125-143.

FERREIRA FILHO CF, KAMO S, FUCK RA, KROGH TE & NALDRETT AJ. 1994. Zircon and rutile geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic intrusion, Brazil: constraints for the timing of magmatism and high grade metamorphism. *Precamb. Res.*, 68: 241-255.

FERREIRA FILHO CF, MORAES RD, FAWCETT JJ & NALDRETT AJ. 1998. Amphibolite to Granulite Progressive Metamorphism in The Niquelândia Complex, Central Brazil: Regional Tectonic Implication. *Jour. S. Amer. Earth Sc.* 11(1): 35-50.

FUCK RA. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In: Simpósio Geologia do Centro-Oeste, 4, Brasília, DF. 1994. Anais... Brasília, SBG, 184-187.

FUCK RA, MARINI OJ, DARDENNE MA & FIGUEIREDO AN. 1988. Coberturas metassedimentares do Proterozóico Médio: os grupos Araí e Paranoá na região de Colinas, Goiás. *Rev. Bras. Geoc.* 18(1): 56-62.

FUCK RA, DANTAS EL, PIMENTEL MM, LAUX JH, JUNGES S, OLIVEIRA CG, DE SORDI DA & CHIARINI MFN. 2006. Sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil: Novos Dados Geológicos, Idades U-Pb em Zircão e Dados Isotópicos. In: Congresso Brasileiro de Geologia 43, Aracaju, 2006, Anais... Aracaju, SBG, 1: 129-129.

GEOSOFT. 2009. OASIS Montaj 7.1. Geosoft, inc., Toronto.

GIRARDI VAV, RIVALENTI G & SINIGOI S. 1986. The petrogenesis of the Niquelândia Layered Basic-Ultrabasic Complex, Central Goiás, Brazil. *Jour. Petrol.* 27(3): 715-744.

HASUI Y & ALMEIDA FFM. 1970. Geocronologia do Centro-Oeste Brasileiro. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, 19(1): 7-26.

HUTCHINSON MF. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia, 106: 211-232.

HUTCHINSON MF. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Jour. Hydrol.*, 106: 211-232.

KECKLER D. 1994. *Surfer® for Windows. User's Guide*. Golden Software, Inc.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A. 2006. Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – Paleo-Neoproterozóico Do Nordeste De Goiás-Convênio SGM / MME / CPRM - SIC / SGM / FUNMINERAL. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Volume I – Texto Técnico 138p.

- LATRUBESSE EM & CARVALHO TM. 2006. Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Relatório Final. Goiânia: SIC/SGM, 118 p. (Série Geologia e Mineração, n.2).
- MAMEDE L, NASCIMENTO MALS & FRANCO MS. 1981. Geomorfologia. In: Projeto RadamBrasil. Folha SD.22 Goiás. Rio de Janeiro. (Levantamento de Recursos naturais, 25).
- MANTOVANI MSM & BRITO NEVES BB. 2005. The Paranapanema Lithospheric Block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) Supercontinent theories. *Gondwana Res.*, 8(3): 303-315.
- MARINI OJ, FUCK RA, DARDENNE MA & FARIA A. 1977. Contribuição à geologia do Pré-Cambriano da porção central de Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, 7: 304-324.
- MARINI OJ, FUCK RA, DANNI JCM, DARDENNE MA, LOGUEIRO SOC & RAMALHO R. 1984. As Faixas de Dobramentos Brasília, Uruaçu e Paraguai-Araguaia e o Maciço Mediano de Goiás. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (Coords.). *Geologia Do Brasil*. DNPM. Brasília. 251-303p.
- MEDEIROS, ES & FERREIRA FILHO CF. 2001. Caracterização Geológica e Estratigráfica das Mineralizações de Platina e Paládio Associadas à Zona Máfica Superior do Complexo de Niquelândia, GO. *Rev Bras Geoc.*, 31(1): 29-36.
- MOREIRA; MLO, MORETON, LC; ARAÚJO, VA; LACERDA FILHO, JV & COSTA, HF. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC-FUNMINERAL.
- MOTTA J, LINDENMAYER D & SILVEIRA NC. 1970. Geologia do Maciço São José do Tocantins. Congresso Brasileiro Geologia. 24; Roteiro Excursão, Bol. Esp 2: 32-37
- MOTTA J, ARAÚJO V, MELLO JCR & OGUINO K. 1972. Projeto Niquelândia. Relatório Final. Goiânia, DNPM/CPRM. vol.1, 224p.
- NABIGHIAN MN. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507-517.
- NABIGHIAN MN. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1): 85-92.
- NASCIMENTO FS, VELOSO FDLM & SABÓIA LA. 1981. Caracterização e discussão sobre a Sequência Vulcano-Sedimentar da Borda Oeste do Maciço de Niquelândia (W do Rio Traíras). In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 1. Goiânia, 1981. Atas... SBG, Goiânia, 470-492.
- NASCIMENTO MALS. 1991. Geomorfologia do Estado de Goiás. *Boletim Goiano de Geografia*. Goiânia: UFG, 12(1).
- PECORA WT & BARBOSA ALM. 1944. Jazidas de Niquel e de Cobalto de São José de Tocantins, Estado de Goiás. DNPM/DFPM, Boletim, 64 p.

- PIMENTEL MM & FUCK RA. 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, 20: 375-379.
- PIMENTEL MM, HEAMAN L, FUCK RA & MARINI OJ. 1991. U-Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-tupe acid magmatism in central Brazil. *Precamb. Resea.*, 52: 321-335.
- PIMENTEL MM, FUCK RA & FISCHER DP. 1999. Estudo isotópico Sm-Nd regional da porção central da Faixa Brasília: implicações para idade e origem dos granulitos do Complexo Anápolis-Itaçu e sedimentos do Grupo Araxá. *Rev Bras Geoc.*, 29(2): 271-276.
- PIMENTEL MM, FUCK RA, JOST H, FERREIRA FILHO CF & ARAÚJO SM. 2000. The basement of the Brasília fold belt and the Goiás magmatic arc. In: CORDANI UG, MILANI EJ, THOMAZ FILHO A & CAMPOS DA. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, DNPM, 195-229 p.
- PIMENTEL MM, FERREIRA FILHO CF & ARMSTRONG RA. 2004. Shrimp U-Pb And Sm-Nd Ages Of The Niquelândia Layered Complex: Meso- (1.25 Ga) And Neoproterozoic (0.79 Ga) Extensional Events In Central Brazil, *Prec. Res.* 132:133-153.
- PIRES ACB & MORAES RAV. 2006. New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation. 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, MG.
- PROJETO RADAMBRASIL. 1981. Folha SD. 22 Goiás. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 640p (Levantamento de Recursos Naturais, v. 25).
- RIVALENTI G, GIRARDI VAV, SINIGOLFI S, ROSSI A & SIENA F. 1982. The Niquelândia mafic-ultramafic complex of Central Brazil: petrological considerations. *Rev. Bras. Geoc.*, 12:380-39.
- ROEST WR, VERHOEF J & PILKINGTON M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1): 116-125.
- SOUZA JO & LEÃO NETO R. 1998. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto Borda Oeste dos Maciços Básico-Ultrabásicos de Niquelândia e Barro Alto. Estado de Goiás, 1:100.000, Brasília: CPRM, 56 p.
- SOUZA FILHO CR & CRÓSTA AP. 2003. Geotecnologias aplicadas à Geologia. *Rev. Bras. Geoc.*, 33(2): 1-4.
- TEIXEIRA AA, SILVA AM, PIRES ACB, MORAES RAV & SOUZA FILHO CR. 2006. Integração e análise de dados aerogeofísicos por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: O exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Rev. Bras. Geof.* 24(4): 559-572

TOU JT & GONZALEZ RC. 1974. Pattern Recognition Principles, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

ULBRICH HHGJ, ULBRICH MNC, FERREIRA FJF, ALVES LS, GUIMARÃES GB & FRUCHTING A. 2009. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. Geol. USP Ser. Cient. 9(1): 33-53.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/>. Acesso em: 02 fev. 2010.

WILFORD JR, BIERWIRTH PN & CRAIG MA. 1997. Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. AGSO Research Newsletter, 33-40.

WILFORD JR, DENT DL, DOWLING T & BRAATEN R. 2001. Using airborne radiometrics and digital elevation models. AGSO Jour. Austr. Geol. Geoph., 33-40.

Artigo completo: Integração de Mapas Multitemáticos no Modelo de Favorabilidade do Depósito de Níquel Laterítico de Niquelândia foi dividido em dois artigos: O Primeiro artigo: Spectral behaviour of the nickel ore in Niquelândia deposit, Goiás, Brazil, using ASTER Satellite Sensor Imaging foi submetido à Revista Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. O Segundo artigo mapeamento Integração de Mapas Multitemáticos no Modelo de Favorabilidade do Depósito de Níquel Laterítico de Niquelândia ainda não foi submetido para publicação.

INTEGRAÇÃO DE MAPAS MULTITEMÁTICOS NO MODELO DE FAVORABILIDADE DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO DE NIQUELÂNDIA

RESUMO

Os depósitos de níquel lateríticos de Niquelândia são oriundos de processos pedogenéticos, desenvolvidos sobre os complexos máfico-ultramáficos a partir da alteração da zona ultramáfica composta por piroxenitos e peridotitos/dunitos. O objetivo deste trabalho foi gerar um modelo de favorabilidade do depósito de níquel nas rochas ultramáficas do Complexo de Niquelândia, GO. A geologia da área é composta por Sequência Inferior constituída por gabronoritos, dunitos piroxenitos, peridotitos, gabronoritos e quartzo-dioritos e Sequência Superior constituída por leucotroctolitos, anortositos, gabros e olivina gabronoritos, com piroxenitos. A maioria dos depósitos de níquel ocorre em “vales suspensos” geralmente entre 950 m a 1100 m de elevação separados por espigões capeados por calcedônia. A metodologia utilizada para gerar o modelo de favorabilidade foi baseada na integração de dados geológicos, de relevo (altimetria, curvatura e declividade), aerogeofísica (magnetométricos e gamaespectrométricos) e produtos de sensoriamento remoto, utilizando as lógicas booleana e *fuzzy*, por meio de Sistema de Informação Geográfica. Os mapas das feições de relevo foram elaborados a partir da geração do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo. Entre os dados aerogeofísicos, foi utilizado o Índice Máfico (IM), que corresponde à associação dos dados magnetométricos (Amplitude de Sinal Analítico – ASA) e gamaespectrométricos (K, eU e eTh). No sensoriamento remoto foi utilizada a técnica de processamento digital na imagem do sensor ASTER para individualização das áreas enriquecidas em níquel, tais como a razão de bandas para ressaltar o Fe³⁺ e curvas espectrais dos minérios oxidados silicatados e do solo do horizonte A presente na área de prospecção de níquel laterítico da área de estudo obtidas por meio de espectrorradiômetro, utilizando o Modelo Linear de Mistura Espectral. As duas técnicas de SR mostraram respostas similares com a utilização das curvas espectrais do solo mais superficial coletado na área de prospecção de níquel. A partir dos resultados das lógicas booleana e *fuzzy*, pode-se dizer que a simplicidade do método booleano é um aspecto positivo, entretanto, mostrou-se mais limitado em resposta ao modelo da lógica *fuzzy*, não tendo uma abrangência no mapeamento como a lógica *fuzzy* visto que este método dá o peso devido a cada critério utilizado.

Palavras-chave: dados aerogeofísicos, relevo, sensoriamento remoto, logicas booleana e fuzzy

ABSTRACT

The nickel deposits in Niquelândia are derived from pedogenetic processes, with the formation of deposits of laterite developed on the mafic-ultramafic complexes from the alteration of

the ultramafic zone composed by pyroxenites and peridotites / dunites. The objective of this work to generate distribution model of nickel deposits in ultramafic rocks of the complex Niquelândia,GO. The geology of the area is composed of Lower Sequence consisting of gabronoritos, dunites pyroxenites, peridotites, gabronoritos and quartz-diorites and Superior Sequence composed of leuco-troctolites, anorthosites, gabbros and olivine gabronoritos with pyroxenites. Most of the nickel deposits occur in "suspended valleys" with elevations ranging from 950 m to 1100 m, separated by ridges covered by chalcedony. The methodology used to generate the model of favorability was based on integration of geological, relief (altimetry, slope and curvature), airborne geophysics (magnetometer and gammaspectrometric) and remote sensing products, using the boolean and fuzzy logics, through Geographic Information System. The maps of the relief features were elaborated from Digital Terrain Model (DTM) of the study area. Regarding the airborne geophysical data, it was used the Mafic Index (MI), which corresponds to an association between the magnetometric data (Amplitude Analytic Signal-ASA) and gammaspectrometric (K, eU and eTh). We used the ASTER satellite data which ratios bands for individualization of areas enriched in Fe³⁺ and spectral curves of the oxidized ores, silicate and soil horizon in the area of nickel laterite exploration in the study area obtained from a spectroradiometer, using the Linear Spectral Unmixing Model (LSUM). The two techniques showed similar responses of SR with the use of spectral curves the most superficial soil collected from in the field of prospecting for nickel. The results of the fuzzy logic and Boolean, can be said that the simplicity of the method is a positive boolean, however, was more limited in response to fuzzy logic the model, having a mapping range as a the fuzzy logic because this method gives due weight to each criterion used.

Keywords: airborne geophysics data, relief, remote sensing, boolean and fuzzy logics

3.1. INTRODUÇÃO

Estudos de modelos de depósitos minerais em escalas de detalhe, visando o entendimento do processo de mineralização e o desenvolvimento de tecnologias para a descoberta de depósitos análogos, têm demonstrado ser importante na pesquisa mineral, marcados pelo crescimento da mineração nestes últimos anos.

Carranza (2009) define modelos preditivos como uma compilação de descrições, representações ou previsões sobre observações indiretas e complexas do mundo real via análise quantitativa de dados relevantes.

A integração de dados digitais geoespaciais multitemáticos (geologia, geomorfologia, aerogeofísica e sensoriamento remoto) vem sendo utilizada nos estudos em geociências. A procura de correlações espaciais utilizando vários tipos de dados com auxílio de geotecnologias tem se mostrado muito eficiente na obtenção de informações geológicas de detalhe (An *et al.*, 1991;

Bonham-Carter, 1994; Dias & Paradella, 1997; Madrucci *et al.*, 2003; Raines & Bonham-Carter, 2006; Miethke *et al.*, 2007; Nykänen *et al.*, 2008; Eddy *et al.*, 2010).

As rochas ultramáficas cobrem menos de 1% da superfície terrestre e apresentam dificuldade na sua delimitação. Uma vez que os processos de intemperismo e tipos de solos resultantes diferem localmente, devido às variações climáticas, natureza do material de origem e outros fatores, incluindo a topografia, a biota e o tempo (Garnier *et al.*, 2009).

Processos intempéricos em rochas ultramáficas têm sido estudados nas últimas três décadas devido à presença de grandes jazidas de minério de níquel de origem pedogenética (Trescases, 1975; Melfi *et al.*, 1980; Colin *et al.*, 1990; Oliveira *et al.*, 1992).

Os depósitos de níquel laterítico foram descobertos no Brasil a partir do século passado, e representam quase a totalidade da mineração de Ni no território brasileiro. Apenas dois depósitos de sulfetados são conhecidos no Brasil: Americano do Brasil, no Estado de Goiás e Fortaleza de Minas, no Estado de Minas Gerais (Oliveira *et al.*, 1992).

No pólo minero-metalúrgico de Niquelândia a mineralização é oriunda de processos pedogenéticos, com a formação dos depósitos de níquel laterítico que foram desenvolvidos sobre o Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, a partir de processos de alteração sobre a zona ultramáfica, a qual é composta por piroxenitos e peridotitos/dunitos parcialmente serpentinizados (Pedroso e Schumaltz 1981, 1986).

No Brasil, as reservas conhecidas de níquel estão distribuídas nos estados de Goiás (45,0%), Bahia (36,3%), Pará (11,3%) e Minas Gerais (7,4%). A produção do estado de Goiás representada pelas empresas Prometalica, Anglo American e Votorantim Metais do Brasil Ltda, produziram, em 2011, 57.487 t de níquel contido nos municípios de Americano do Brasil, Barro Alto e Niquelândia (DNPM, 2011).

O objetivo deste trabalho foi gerar um modelo de favorabilidade do depósito de níquel sobre as rochas ultramáficas do Complexo de Niquelândia, GO por meio de análise integrada de dados geológicos, geomorfológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto.

A área de estudo localiza-se no estado de Goiás, município de Niquelândia, no Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia. O acesso se dá, a partir de Brasília, pela rodovia BR-080 até a cidade de Padre Bernardo. De Padre Bernardo segue-se pela BR080 até BR414 e segue por essa rodovia em direção a Niquelândia (Figura 1).

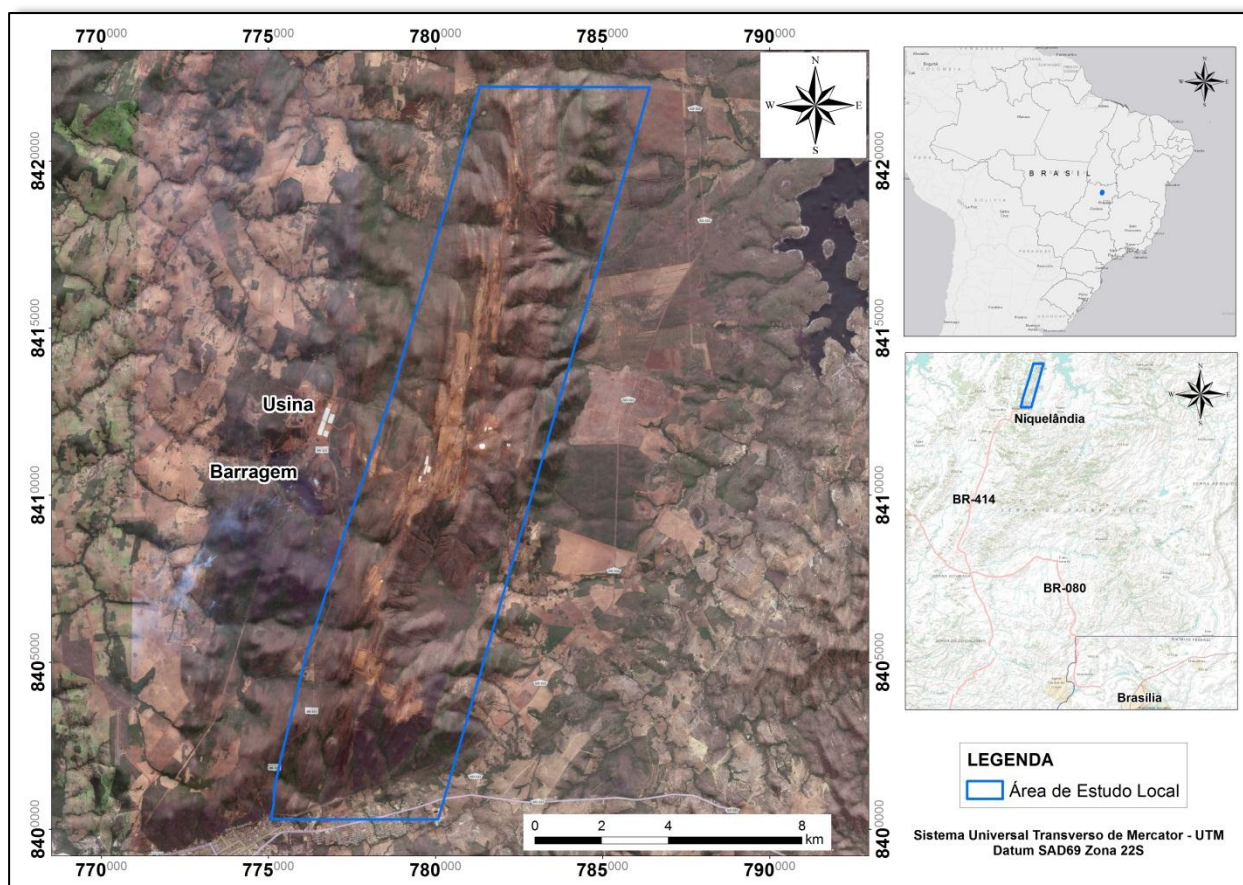


Figura 1 - Localização da área de estudo (depósito de níquel de Niquelândia, GO).

3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

O Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia está inserido na Província Tocantins (Mantovani & Brito Neves, 2005), um extenso orógeno colisional, de idade neoproterozóica, gerado entre os crátons Amazônico (margem passiva), São Francisco/Congo e Parapanema (margem ativa). Segundo Pimentel *et al.* (1991), Pimentel & Fuck (1992) e Fuck *et al.* (2006), a Província é dividida em três cinturões dobrados supracrustais conhecidos como faixas Araguaia, Paraguai e Brasília.

O Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia apresenta uma forma ovóide, balizado por falhas, com aproximadamente 45 km de extensão na direção N10E e tem sido alvo de muitos estudos, desde o primeiro trabalho de Pecora & Barbosa (1944) até os dias atuais. Durante este período, muitas hipóteses foram postuladas sobre a sua origem, sendo que os resultados mais atuais se referem à sequência máfica-ultramáfica acamadada, de acordo com os trabalhos de Motta *et al.* (1970; 1972), Danni & Leonardos (1978), Danni *et al.* (1982), Rivalenti *et al.* (1982), Girardi *et al.* (1986), Ferreira Filho *et al.* (1992; 1994), Ferreira Filho & Naldrett (1993), Brito Neves *et al.* (1995), Correia *et al.* (1996) e Pimentel *et al.* (2004). Entre as várias interpretações dadas para a origem do complexo, estão as de Girardi *et al.* (1986) que considerou uma intrusão única e formada a partir de um mesmo magma parental. Ferreira Filho *et al.* (1994; 1998) consideraram a existência de dois conjuntos de rochas cumuláticas petrologicamente distintos.

Dados geológicos e geocronológicos (Correia *et al.*, 1996; 1997; 1999), Ferreira Filho & Pimentel (1999) e Medeiros & Ferreira Filho (2001) permitiram individualizar o Complexo de Niquelândia em duas Sequência (Figura 2).

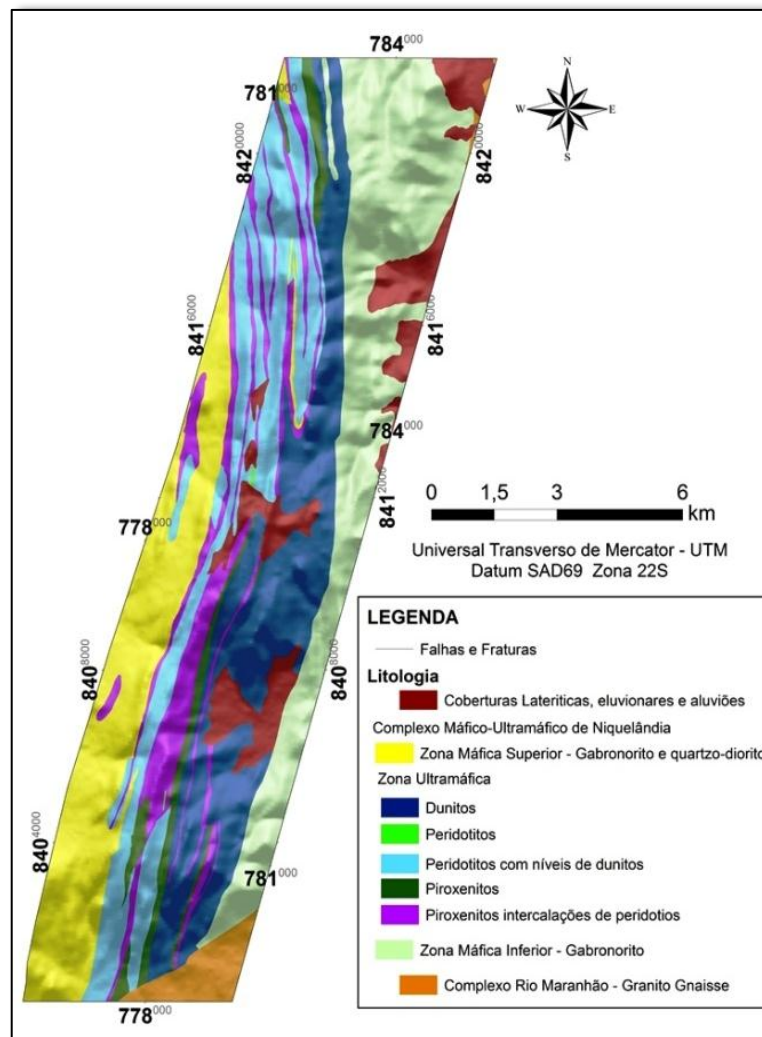


Figura 2 - Mapa geológico do trabalho final do curso de geologia – UnB. Fonte Danni *et al.*, 1977.

A) **Sequência Magmática Inferior** - Unidade da Serra da Mantiqueira dividida em três zonas: i) Zona Máfica Inferior, constituída predominantemente de gabronoritos com níveis secundários de piroxenitos; ii) Zona Ultramáfica Intermediária, composta essencialmente por dunitos com piroxenitos intercalados; iii) Zona Máfica Superior, dominada por gabronoritos, com intrusões de quartzo-dioritos. A Unidade João Caetano é formada predominantemente por rochas intrusivas de composição granítica e diorítica; B) **Sequência Magmática Superior** - Unidade Serra dos Borges formada por intercalações de leuco-troctolitos, anortositos, gabros e olivina gabronoritos, com piroxenitos subordinados e níveis de óxidos de Fe-Ti (magnetita e ilmenita).

A sequência vulcano-sedimentar de Indaianópolis associada ao Complexo de Niquelândia (Danni & Leonardos, 1980) é constituída por remanescentes de crosta oceânica de idade mesoproterozóica (1,2 Ga), segundo Pimentel *et al.* (2000). Souza & Leão Neto (1998)

caracterizaram esta sequência em duas subunidades: inferior e superior. A Sequência Inferior é composta por anfibolitos finos com intercalações de biotita-xistos, biotita-gnaisses, metacherts e formações ferríferas bandadas. A Sequência Superior é composta por riolitos e tufos riolíticos, xistos, quartzitos, anfibolitos finos e metacherts.

3.3. GÊNESE DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO E RELEVO

No Brasil, a grande maioria das reservas de níquel laterítico é produto de intemperismo de rochas ultramáficas (Oliveira *et al.*, 1992). As condições de formação dos depósitos de níquel podem ser de dois tipos: depósitos de sulfetos de origem hipogênico e depósitos lateríticos de origem supergênico (Lombard, 1956; Boldt, 1967). O níquel laterítico ocorre em uma cobertura espessa de intemperismo de rochas ultramáficas em áreas de clima tropical.

A pesquisa sobre os depósitos de níquel supergênico no Brasil, desenvolvida a partir de vários tipos de rochas ultramáficas em diferentes condições climáticas, permite uma avaliação do papel dos fatores petrológicos e morfoclimáticos na gênese do níquel laterítico (Oliveira *et al.*, 1992). Entre os fatores que influenciam a sua formação, como a litologia e a estrutura, destacam-se as rochas ultramáficas, o clima tropical com contraste sazonal e o relevo com rejuvenescimento secundário após uma elevação tectônica (Trescases *et al.*, 1981).

Segundo Pecora e Barbosa (1944), os jazimentos de níquel ocorrem nos vales longitudinais da Serra da Mantiqueira (no sentido N-S), sendo sua forma e tamanho influenciados pela continuidade e largura da faixa peridotítica não serpentinizada subjacente e pela altitude e relevo topográfico. De acordo com esses autores, os jazimentos foram formados pelo intemperismo prolongado, com lixiviação e enriquecimento de níquel sobre as rochas piroxeníticas.

As pesquisas realizadas por Costa (1970) nas jazidas de Niquelândia permitiram concluir que as áreas mineralizadas da faixa piroxenítica, a oeste, ocorrem geralmente em vales alongados acima de 950m de altitude, enquanto as mineralizações da faixa serpentinítica a leste, apresentam-se em manchas irregulares e descontínuas, ao longo dos vales, abaixo de 950 m. Foram identificados dois tipos de minério laterítico: ferruginoso, com teores médios de 1% de níquel e 35 a 45% de ferro e garnierítico ou silicatado, com teores médios de 1 a 4% de níquel e 5 a 15% de ferro.

Motta *et al.* (1972), afirmam que a maioria dos depósitos ocorrem em “vales suspensos”, geralmente entre 950 m a 1100 m, separados por espigões capeados por calcedônia. Os depósitos dos vales mais altos são geralmente mais ricos em níquel e com maiores profundidades. O minério do tipo granierítico ou silicatado, definido por Motta *et al.* (1972) e Pedroso e Schumaltz (1981, 1986), ocorre principalmente na subzona piroxenito-peridotítica e é do tipo limonítico ou ferruginoso, predominando na subzona peridotito-dunítica a leste.

Pedroso e Schumaltz (1981, 1986), ressaltaram a influência da erosão, com a preservação de depósitos lateríticos localmente protegidos por capeamento de calcedônia formando as encostas dos

“vales suspensos” nas cotas de 900 e 1.050m. Esses autores relataram ainda que os maiores teores de níquel no minério garnierítico dos depósitos de níquel em Niquelândia foram formados pelo aporte lateral de soluções com níquel lixiviado das rochas peridotíticas, conforme descrito também por Pecora e Barbosa (1944).

Oliveira *et al.* (1992) afirmaram que no Maciço de Niquelândia, o minério é principalmente do tipo silicatado, associado com o saprolito grosseiro e o saprolito argiloso, mesmo quando de origem piroxenítica. Ainda segundo esses autores, o níquel presente nas esmectitas é originário dos dunitos, que estão em posições topograficamente superiores. O teor de níquel nos piroxenitos frescos não é suficiente para produzir concentrações econômicas. A parte menos importante do minério é do tipo oxidado, relacionada com o saprolito ferruginoso (Figura 3).

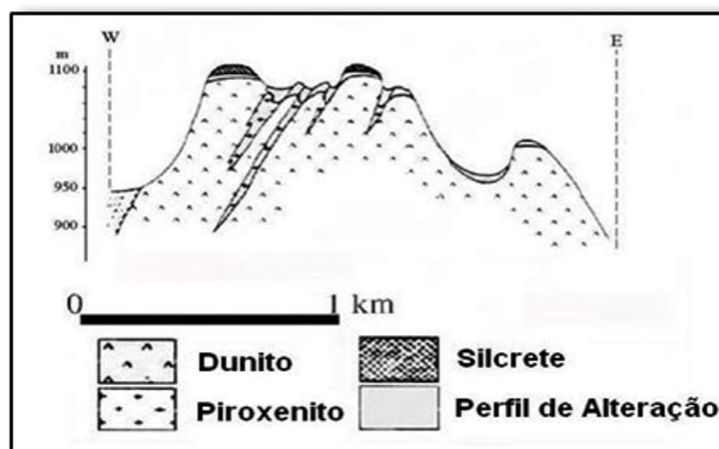


Figura 3 - Seção geológica do depósito de níquel. Fonte: Oliveira *et al.*, 1992.

Na evolução da formação do depósito de níquel em Niquelândia, descrito por Oliveira *et al.* (1992), o horizonte esmectítico desenvolvido a partir dos piroxenitos comportou-se como uma armadilha para o níquel, proveniente da migração lateral dos dunitos e peridotitos. O atraso na alteração dos piroxênios em comparação com as olivinas e da serpentina em comparação com os dois outros silicatos foi responsável pela sucessão de diferentes horizontes saprolíticos, na parte inferior do perfil de intemperismo. A alteração ocorre quando as soluções percolaram os minerais por meio de fraturas e fissuras. Portanto, o produto do intemperismo ocorreu mais rapidamente em zonas fraturadas e conseqüentemente, a liberação de níquel foi mais completa. Quando as circulações das soluções se tornaram mais acentuadas, o níquel migrou para baixo, enriquecendo os minerais herdados, ainda não alterados (serpentinizados) ou os minerais secundários neoformados (esmectitas e garnieritas). Tais acumulações de níquel têm sido observadas em todos os depósitos brasileiros.

Segundo Colin *et al.* (1990) a formação dos depósitos de níquel em Niquelândia ocorreu da seguinte forma: o níquel foi liberado pelo intemperismo da olivina, piroxênio e minerais serpentinizados. Ele se acumulou na base do perfil em minerais (esmectitas provenientes de

piroxênios e garnierita em acumulação nas fraturas) autigênicos, produtos do intemperismo e, ainda em grãos de serpentina resistentes. Com o aumento do intemperismo, cristais de esmectita, garnierita e serpentina foram desestabilizados. O níquel foi liberado novamente e redistribuído em filossilicatos recém-formados na base dos perfis. Esse acúmulo foi mais intenso, onde a rocha encontrava-se altamente fraturada. Como resultado, os principais minerais formados foram as esmectitas trioctahedrais.

A gênese do níquel laterítico é desenvolvida a partir de vários tipos de rochas ultramáficas em diferentes condições climáticas e permite a avaliação do papel dos fatores geológicos e morfoclimáticos na sua formação (Trescases *et al.*, 1981; Oliveira *et al.*, 1992). O minério se formou pela concentração gradativa de níquel a partir da evolução de processos geomorfológicos que modelou o relevo, sendo um fator determinante no desenvolvimento de horizontes de alteração laterítica, ligados a processos de intemperismo que atuam sobre as rochas ultramáficas (Melfi *et al.*, 1980; Trescases *et al.*, 1981). A atuação do intemperismo sobre as rochas ultramáficas necessitou de algumas condições favoráveis (clima, relevo e drenagem) no processo de lixiviação seletiva dos elementos constituintes da rocha original, permitindo a concentração do níquel em condições de gerar depósitos econômicos.

Os principais minerais que compõem o perfil de intemperismo do depósito de níquel laterítico são: pimelita, saponita, goethita, hematita, caulinita (Carvalho Junior *et al.*, 2003). Isso pode ser observado na Figura 4 que representa o empilhamento dos minerais na jazida de níquel laterítico. A pimelita e a saponita estão contidas na garnierita que é um termo genérico para definir uma mistura de hidrossilicatos de magnésio e níquel.

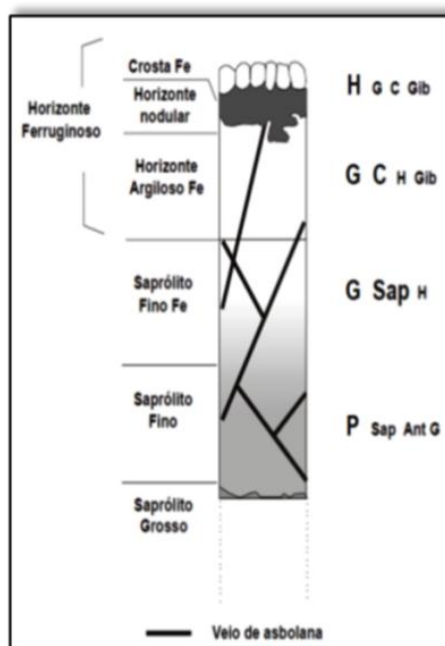


Figura 4 - Perfil de intemperismo da mina de Niquelândia. C= caulinita; G = goethita, Gib = gibsitita H = hematita; Sap = saponita, Ant = antigorita; P = pimelita, letras maiúsculas = muita abundância; letras minúsculas = pouca abundância. Fonte: Carvalho Junior *et al.*, 2003.

3.4. VEGETAÇÃO

O Cerrado é um complexo mosaico de formações campestres, savânicas e florestais segundo Bonnet *et al.*, (2006). Goiás é o único Estado brasileiro integralmente inserido no Bioma no Cerrado na região neotropical. O Bioma Cerrado é um complexo vegetacional composta por três formações vegetais: campestre, savânicas e florestais (Ribeiro & Walter, 1998). A composição vegetativa possui aspectos particulares, as árvores são baixas com troncos retorcidos, folhas e cascas grossas, além de raízes profundas para que nos período da seca (maio a setembro) as raízes possam atingir o lençol freático e, dessa forma, obter água. Além do cerrado que é predominante, é encontrado também no Estado uma restrita área de floresta tropical, que abrange o mato-grosso goiano e vestígios de floresta atlântica nas proximidades de Goiânia, Anápolis, além de outras cidades do sul de Goiás. Esse tipo de vegetação é comum, principalmente, em áreas acidentadas e nas margens de mananciais.

Brooks *et al.*, (1990) afirma que a vegetação no Maciço de Niquelândia está relacionada a um forte controle geológico. Nessa região, extensas áreas de rochas ultramáficas são cobertas por vegetação herbácea dominada por gramíneas enquanto as rochas gabróicas apresentam vegetação arbórea conforme observado por Carvalho *et al.* (2005). O fogo que ocorre durante os meses mais secos (junho – agosto) influencia em certo grau a fitofisionomia da vegetação, entanto, isoladamente, o fogo não explica o limite abrupto entre as rochas gabróicas (máficas) e o substrato ultramáfico descrito por Carvalho *et al.* (2001). Ainda segundo esses autores diferentes graus de floresta aberta ou floresta baixa (mata) podem ser encontrados ao longo dos cursos d'água e vales. A existência dessas áreas demonstra a habilidade de muitas espécies tolerarem os solos provenientes de rochas ultramáficas, desde que se tenha profundidade e umidade nos solos adequados, além da proteção ao fogo.

3.5. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse estudo foram utilizados os seguinte conjunto de dados: (1) mapa geológico (Danni *et al.*, 1977) na escala de 1:50.000; (2) imagem do sensor ASTER 1B de 21/08/2001, (3) dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) (Lasa, 2006); (4) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), 2000; e (5) Delimitação das cavas da mina de níquel de Niquelândia extraídas pelas imagens Google Earth e Bing Maps.

3.5.1 Processamento de Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos de magnetometria (campo total) e gamaespectrometria (canais de potássio, tório e urânio) foram obtidos de dois arquivos no formato tabular do tipo ASCII (.GDB) que foram importados para o software Oasis Montaj (Geosoft® 2009), para geração de mapas magnetométricos e gamaespectrométricos em escala 1:100.000.

A descrição da aquisição e correções dos dados aerogeofísicos foram obtidas do relatório final do levantamento aerogeofísico do Estado de Goiás (magnetometria e gamaespectrometria) da área 5 denominado Projeto “Paleo-neoproterozóico do Nordeste de Goiás”-Etapa 3, realizado em 2006 pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S.A. (LASA, 2006) conforme dados do levantamento apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados do levantamento magnetométrico e gamaespectrométrico.

Métodos:	Magnetometria e Gamaespectrometria
Contratante:	Governo do Estado de Goiás/SIC - MME/ CPRM Serviço Geológico do Brasil
Contratado	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.
Período	01/05/2006 a 01/09/2006
Intervalo (AM)	0,1s (magnetometria) e 1,0s (gamaespectrometria)
Altura de Voo	100m
Direção (LV)	N-S
Espaçamento (LV)	0,5 km
Direção (LC)	E-W
Espaçamento (LC)	5 km
Tempo de Integração Gama	1

Após a aquisição dos dados aerogeofísicos, o primeiro passo no processamento foi o recorte dos dados de acordo com a área de estudo e a avaliação dos dados obtidos. O processamento seguiu os procedimentos apresentados na Figura 5.

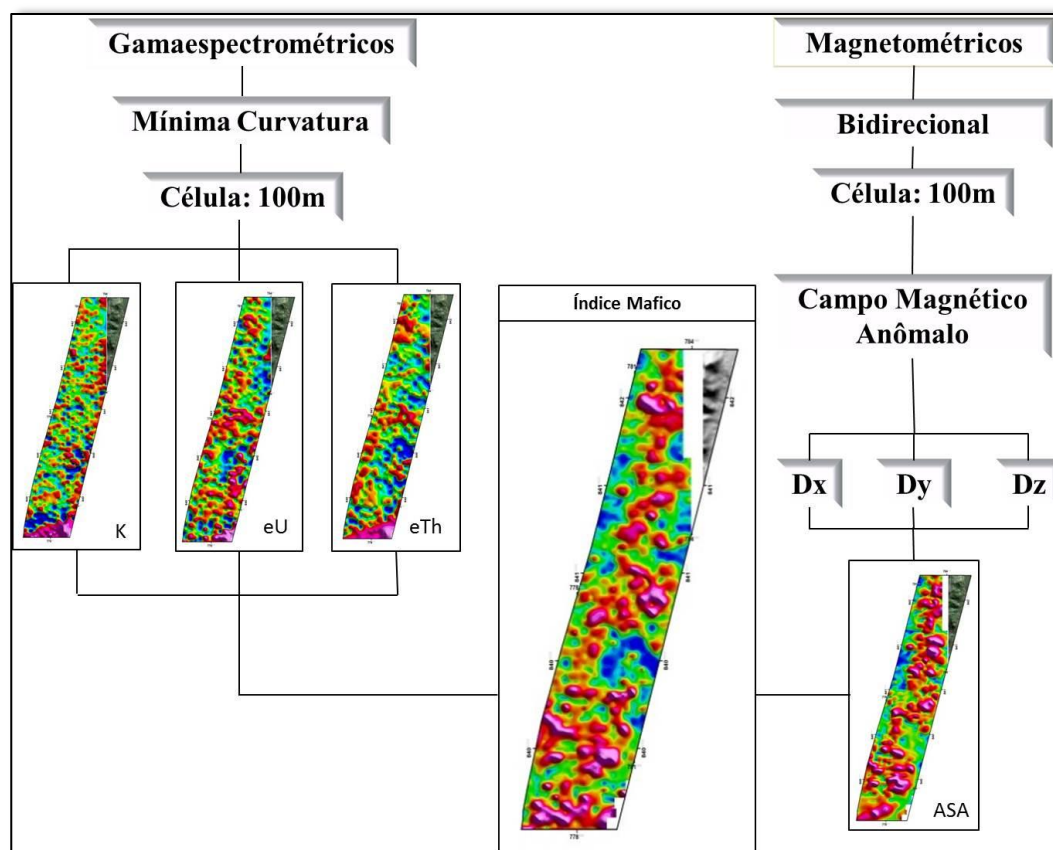


Figura 5 - Etapas do processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos.

3.5.1.1. Dados Gamaespectrométricos

Os dados gamaespectrométricos foram cedidos já convertidos em porcentagem para o potássio (K) e em ppm equivalente para urânio (eU) e tório (eTh), dispensando a transformação das contagens por segundo (CPS).

Os dados gamaespectrométricos dos canais de K, eTh e eU mostraram alguns valores negativos devido à correção atmosférica não efetiva e/ou calibração dos instrumentos. Assim, o banco de dados gamaespectrométricos foi homogeneizado e, para o canal do K(%), foi somado uma constante igual a 1 vez o desvio-padrão dessa variável. Para os dados eU ppm, foi somado uma constante igual 2 vezes o desvio-padrão dessa variável e dos valores eTh ppm foi somado uma constante igual a ¼ do desvio-padrão dessa variável. . As correções foram efetuadas com objetivo de aproximar os valores das médias dos radioelementos em relação às rochas máficas (cerca de 1% K; 0,7 ppm U e 3 ppm Th) segundo Dickson & Scott (1997). Em seguida, foram eliminados os valores negativos, na interpolação dos dados.

Os dados do levantamento foram interpolados sem a utilização das linhas de controle, uma vez que a utilização do micronivelamento não possibilitou a total eliminação dos resíduos de “desnivelamento” que ainda permaneceram nos dados.

Para interpolação dos dados para obter as imagens do K (%), eTh (ppm) e eU (ppm), o tamanho de célula unitária das malhas foi definida em 1/5 do espaçamento das linhas de voo, 100 m x 100 m, tentando evitar a perda de informação. O método de interpolação aplicado foi o de Curvatura Mínima (rangrid, Geosoft, 2009) para os dados da gamaespectrometria por melhor representar os dados originais e devido ao *trend* geológico ser aproximadamente paralelo à direção da linha de voo. A Curvatura mínima gera uma superfície suavizada com os valores o mais próximo possível dos dados originais (Keckler, 1994).

3.5.1.2. Dados Magnetométricos

Os valores do Campo Magnético Total (CMT) proveniente da leitura do magnetômetro tem contribuição tanto do magnetismo remanescente das rochas quanto do núcleo terrestre. Para geração dos dados do campo magnético anômalo que reflete a variação da susceptibilidade magnética das rochas da região, deve-se retirar, com a utilização por modelos matemáticos, o Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF). Com a retirada do IGRF, o campo resultante o qual representa as anomalias magnéticas situadas na crosta acima da superfície Curie, é denominado de campo magnético anômalo (CMA).

O método bidirecional (bi-grid, Geosoft, 2009) foi o escolhido para a interpolação dos dados de magnetometria, pois resultou no maior detalhamento das anomalias magnéticas, em contraste com um baixo nível de ruídos. A partir do produto Campo Magnético Anômalo (CMA), foram geradas as derivadas horizontais X (Dx) e Y (Dy) e a derivada vertical em Z (Dz).

As Derivadas horizontais Dx e Dy são usadas no intuito de realçar os gradientes horizontais e, por conseguinte, as possíveis fontes das anomalias representadas (filtros passa-alta) (Blum, 1999). O filtro de derivada vertical em Z (Dz) promove a amplificação do comprimento de onda curto em relação aos de comprimento de onda longos, funcionando como um filtro passa-alta. Em seguida foi gerada a Amplitude do Sinal Analítico (ASA) por meio das derivadas Dx, Dy e Dz (Roest *et al.*, 1992), utilizando a equação 1 abaixo:

$$ASA = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

O produto Amplitude do Sinal Analítico (ASA) permite o posicionamento de corpos magnéticos, pois a técnica compreende uma função simétrica em que os picos do sinal analítico encontram-se centrados nas bordas das anomalias magnéticas (Nabighian 1972, 1974; Roest *et al.* 1992).

Com os dados magnetométricos (ASA) e gamaespectrométricos (K eU e eTh) foi gerada a equação do Índice Máfico (IM) (Equação 2). O IM é uma técnica útil para individualização de corpos de origem máfica e ultramáfica (Pires & Moraes, 2006).

$$IM = \frac{(ASA * eU * eTh)}{K} \quad (\text{Eq. 2})$$

A fórmula foi gerada a partir das análises das respostas dos dados aerogeofísicos. Dados gamaespectrométricos (eU e eTh) e magnetométricos (ASA) que apresentaram altos valores foram combinados na forma de produto. Dados que apresentaram valores baixos como o K foi utilizado na fórmula com objetivo de eliminar qualquer influência deste radioelemento na resposta do IM na área de estudo (Figura 4).

3.5.2. Relevo

As informações sobre o relevo foram geradas por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT), que são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem, com um valor de elevação em cada *pixel*.

Foram utilizados os dados de MDT, de 2000, oriundos do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS). Os dados SRTM apresentam resolução horizontal (resolução espacial) de 90 m e resolução vertical de 1 m.

Os dados SRTM foram transformados para vetor tipo ponto e, em seguida, foram interpolados a partir da aplicação da função *Topo to Raster* (Hutchinson, 1998; 1999), presente no ArcGIS 10, com *pixel* de 30 m x 30 m. Esse procedimento possibilitou uma melhor qualidade visual do MDT devido à mudança da resolução espacial para 30 metros, mas mantendo as informações da resolução original de 90 m (SRTM). As informações do relevo foram geradas utilizando o MDT

sendo dele derivados os mapas de classes de declividade, hipsometria e curvatura e que foram posteriormente reclassificados. A altimetria foi reclassificada nas seguintes classes: 517-950 m, 950-1.100 m e 1.100-1.143 m; a declividade foi reclassificada nas seguintes classes 0-24% , 24-45% e >45% e a curvatura foi reclassificada nas seguintes classes: -1,95 a 0, 0 e 0 a 2,55. Valores positivos para as curvaturas convexas, valores negativos para as curvaturas côncavas e valores nulos para a curvatura retilínea.

Essas classes foram definidas com base em observações de campo e referências bibliográficas.

Os procedimentos foram efetuados em ambiente do Sistema de Informação Geografia (SIG), no software ArcGIS 10 e suas extensões *3D Analyst* e *Spatial Analyst* (Esri®, 2011).

3.5.3. Processamento da Imagem do Sensor ASTER

O Sensoriamento Remoto possui a capacidade de identificação e a distinção das composições dos diferentes materiais superficiais, sejam eles tipos de vegetação, padrões de uso do solo, rochas e outros (Crósta, 1992). Várias técnicas podem ser usadas utilizando informações das curvas espectrais em imagens hiperespectrais e multiespectrais.

A utilização de técnicas de análise espectral permite uma boa estimativa para a identificação de alvos de interesse em produtos de sensoriamento remoto. Neste trabalho, foi utilizada uma cena L1B obtida em 21/08/2001 do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), a bordo do satélite Terra. A plataforma Terra, que carrega o sensor ASTER, foi lançada em 18 de dezembro de 1999. O sensor ASTER é formado por três subsistemas: (a) visível e infravermelho próximo (VNIR) com 3 bandas espectrais e resolução de 15 metros, (b) infravermelho de ondas curtas (SWIR) com 6 bandas espectrais e resolução espacial de 30 metros e (c) infravermelho termal (TIR), com 5 bandas espectrais e resolução espacial de 90 metros (Figura 6).

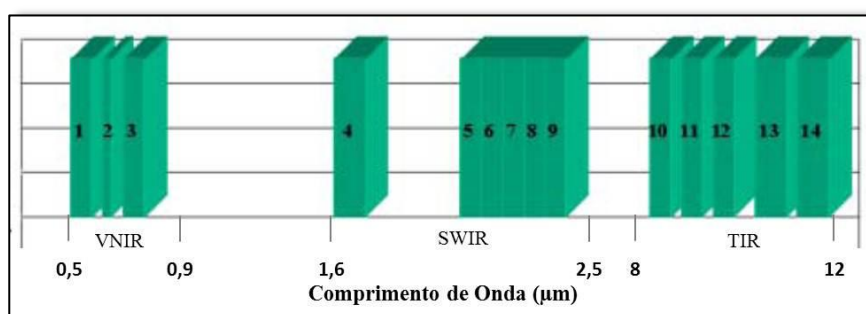


Figura 6 – Intervalo espectrais das bandas da imagem do sensor ASTER.

O processamento foi desenvolvido em quatro etapas: a) pré-processamento digital das imagens do sensor ASTER; b) aquisição de curvas espectrais de amostras de solos e rochas coletadas em campo, por meio de leitura com o espectrorradiômetro em laboratório; c)

processamento digital das imagens do sensor ASTER para individualização das áreas enriquecidas em Ni; e d) análise e interpretação dos produtos gerados (figura 7).

O pré-processamento digital da imagem do sensor ASTER compreendeu as seguintes etapas: correção do efeito de *cross-talk*, por meio do programa CRSTK30 (ERSDAC 2006); reamostragem das bandas do SWIR para 15m e fusão das bandas do VNIR e SWIR e correção atmosférica.

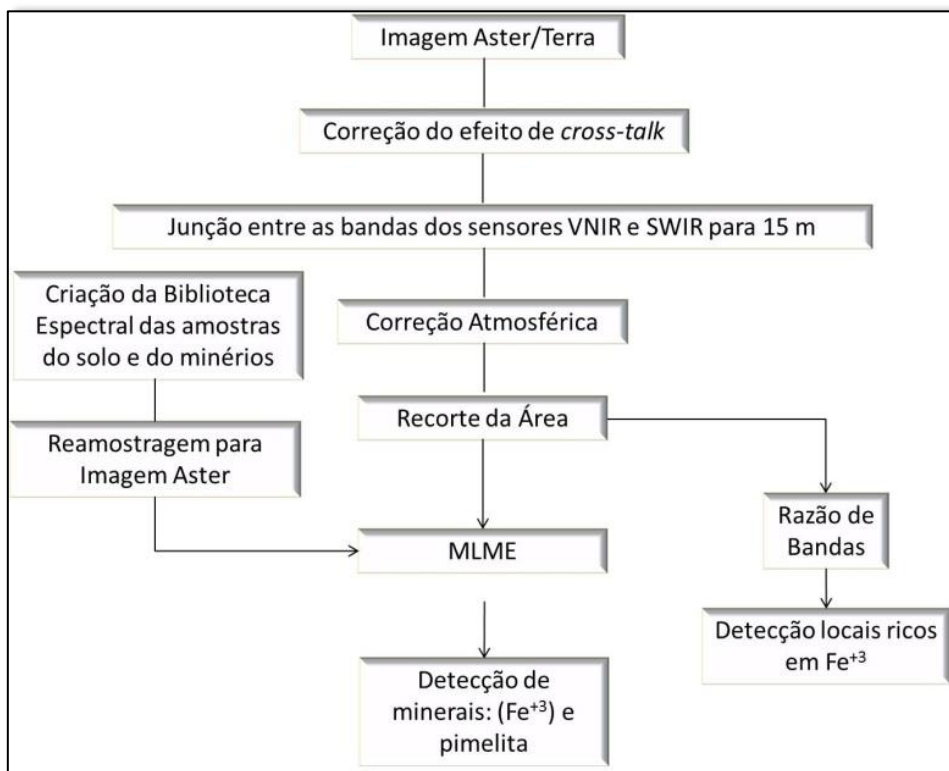


Figura 7 – Fluxograma dos procedimentos realizados na imagem do sensor ASTER.

As imagens do sensor ASTER foram corrigidas em relação ao efeito de *cross-talk*, que atua nas bandas do SWIR e é causado pela dispersão da radiação eletromagnética - REM incidente sobre os detectores da banda 4. As bandas 4, 5, 6, 7, 8 e 9 do SWIR foram reamostradas para quinze metros, ficando com a mesma resolução espacial das bandas 1, 2 e 3 do VNIR. A correção atmosférica foi realizada utilizando-se o programa FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) do programa ENVI 4.8, baseado no uso do MODTRAN 4 (Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model), que transforma valores de radiância para valores de reflectância de superfície. A correção atmosférica é necessária para remover os efeitos devido às mudanças de geometria satélite-sol e das condições atmosféricas. Posteriormente, foi feito o recorte da imagem de acordo com a área de estudo.

3.5.3.1. Razão de Bandas

O princípio básico das razões de bandas é suprimir a informação espectral comum entre as elas e realçar a diferente. Em termos gerais, a soma e a multiplicação servem para realçar similaridades espectrais entre imagens de diferentes bandas ou datas, enquanto a subtração e a divisão são utilizadas para realçar diferenças espectrais dos alvos (Meneses & Almeida, 2012). A

razão de bandas permite discriminar diferentes materiais superficiais com base na análise das características da curva espectral, constatadas pelo posicionamento de gradientes de reflectância ou de emissividade do(s) alvo(s) adotado(s), ao longo do intervalo do espectro eletromagnético considerado.

No processamento digital da imagem do sensor ASTER de 2001, foram utilizadas as bandas do VNIR e SWIR para obter o realce de áreas ricas em Fe^{+3} (hematita). Essa técnica foi utilizada, pois o perfil de intemperismo mineralógico do depósito de níquel apresenta no topo minerais ricos em Fe^{3+} como a hematita. Inicialmente foi realizada a razão entre B2/B1 com o objetivo de identificar materiais ricos em Fe^{3+} (hematita, goethita), considerando que o ferro apresenta uma feição de absorção na banda 1 e maior reflexão na banda 2. Em seguida, foi realizada a razão e soma das bandas $(B5/B3)+(B1/B2)$, de forma a realçar áreas ricas em Fe^{2+} (Rowan & Mars, 2003). No final foi realizada razão entre os produtos $R\text{Fe}^{3+}/R\text{Fe}^{2+}$ com objetivo de destacar áreas ricas Fe^{3+} principalmente a hematita (Robb, 2004) e eliminar áreas ricas em Fe^{2+} .

3.5.3.2. Mapeamento Espectral

Para individualização das áreas enriquecidas em Ni, foi criada uma biblioteca espectral das amostras coletadas dos minérios silicatados, oxidados e do solo do horizonte A presente na área de prospecção do níquel laterítico. Na leitura das curvas espectrais foi utilizado o espectrorradiômetro portátil FieldSpec® 3 Hi-Res (350-2500nm) / A100590, capacitado para realizar medidas espectrais de materiais diversos (rocha, solo, planta, água) (Figura 8a). Como padrão de referência foi utilizada uma placa de sulfato de bário que possui alta reflectância difusa, pois se comporta como uma superfície lambertiana e é utilizada para estimar a irradiância. Utilizou-se o software RS2 para converter as medidas de radiância. As curvas obtidas por meio do espectrorradiômetro foram reamostradas para a resolução espectral do sensor ASTER utilizando o programa ENVI® 4.8 (Figura 8b).

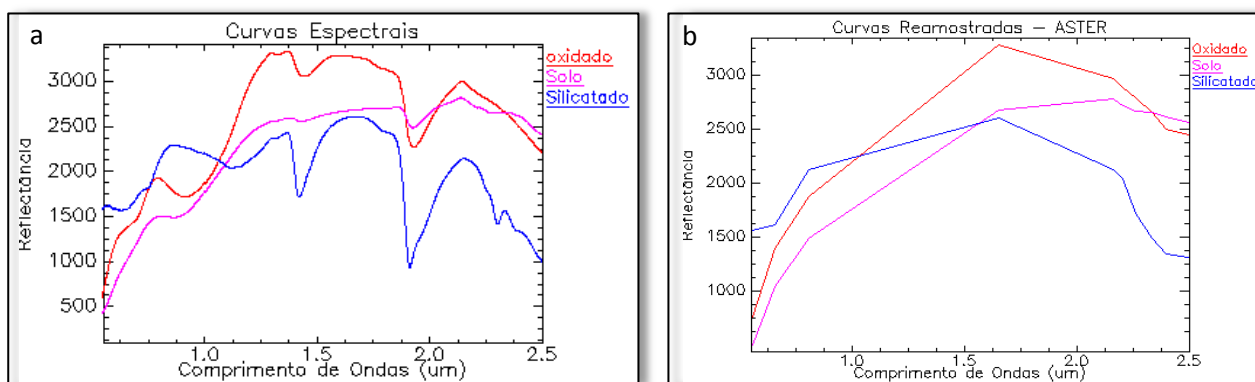


Figura 8- Curvas espectrais das amostras do minério oxidado (vermelho), solo (magenta) e minério silicatado (azul). As curvas foram extraídas das amostras minérios e do solo com uso do espectrorradiômetro (a) e curvas espectrais reamostradas para resolução espectral da imagem do sensor ASTER (b).

Com a biblioteca espectral criada, utilizou-se o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para mapeamento dos minerais presentes nas amostras. O MLME é uma técnica, a princípio mais refinada que a razão de bandas, para a identificação mineral a partir das respectivas assinaturas espectrais das amostras. O MLME tende a separar os materiais na composição do pixel pela decomposição espectral linear da reflectância correspondente e propõe determinar a abundância relativa de materiais de forma precisa na escala de subpixel (Shimabukuro & Smith 1991). O resultado do MLME é a individualização, por banda, para cada material analisado e o erro médio quadrático da decomposição. Foi aplicada a técnica MLME utilizando as curvas espectrais dos minérios oxidado, silicatado e solo e com as bandas geradas foi feita a composição colorida RGB – oxidado, silicatado e solos.

Para ajudar na interpretação das curvas espectrais, foram feitas análises usando o difratometria de raios-(DRX) com objetivo de obter a composição mineralógica das amostras dos minérios silicatados e oxidados e do solo da área mineralizada. Para DRX foi utilizado o equipamento o Difratômetro da Rigaku, modelo Ultima IV do Laboratório de Difratometria de Raios-X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB), que dispõe de um goniômetro e de um filtro em linha, ambos controlados por computador.

3.5.4. Integração de Dados

Modelagem em SIG (Sistema de Informação Geográfica) é um processo de combinar um conjunto de mapas de entrada através de uma função que gera um mapa de saída (Bonham-Carter, 1994). Há várias técnicas de classificação para o mapeamento de potencial mineral que se enquadra em duas metodologias distintas: o *Data-driven* (modelos calculados a partir de pontos de ocorrências conhecidas, tais como pesos de evidência, regressão logística e redes neurais Artificiais) e o *Knowledge-driven* (modelos definidos por especialistas tais, como lógicas *fuzzy* e booleana) (Bonham-Carter, 1994). O método booleano é uma lógica de dois valores enquanto que o método *fuzzy* é uma lógica com muitos valores e que lida com conceitos inexatos (Silva, 2003).

Os mapas utilizados (altimetria, declividade, curvatura, geologia e aerogeofísica) foram aplicadas as lógicas booleana e *fuzzy*, em ambiente de sistema de informações georreferenciadas, visando obter o modelo de favorabilidade do depósito de níquel de Niquelândia. Os dois métodos foram utilizados com o objetivo de avaliar qual deles responde melhor as informações oferecidas da área de estudo, visto que o minério se encontra em áreas bem restritas e sem grandes variações laterais na sua distribuição.

3.5.4.1. Lógica Booleana

A lógica booleana, criada no século XIX pelo matemático inglês George Boole, envolve combinação lógica de mapas binários e baseia-se em estabelecer limites determinados a partir de informações consideradas falsas, onde são atribuídos atributo 0 (zero); e verdadeiras, atributo 1

(um) (Silva, 2003) não sendo possível à condição talvez. Em casos onde limiares de corte foram estabelecidos por lei ou por códigos, combinações booleanas são abordagens práticas e de fácil aplicação (Câmara *et al.*, 2001). Os vários planos de informação são combinados, segundo uma sequência lógica, para dar suporte a uma hipótese (Moreira da Silva, 2001). Ainda segundo esse autor é um método prático, mas as variáveis são tratadas com a mesma importância. A lógica booleana se utiliza dos seguintes operadores: AND (interseção), OR (união), NOT (negação) e XOR (exclusão) (Burrough & McDonnell, 1998) (Figura 9).

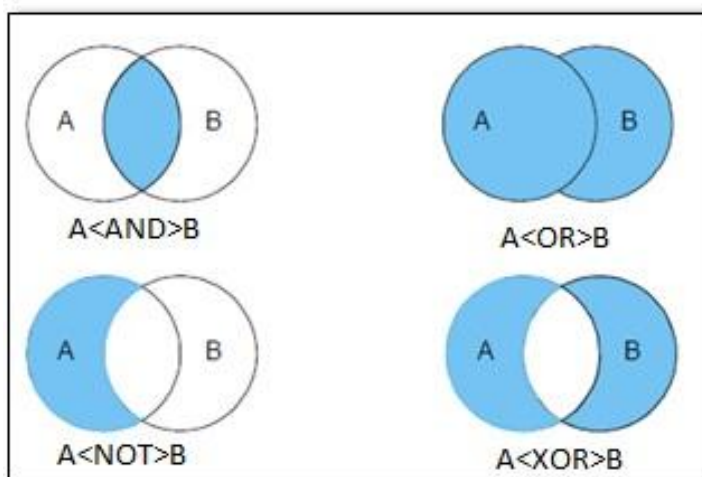


Figura 9 – Diagrama de Venn apresentado os operadores OR, AND, NOT e XOR da lógica booleana. Fonte: Burrough & McDonnell, 1998.

Cada mapa temático utilizado foi definido como um plano de informação (evidência). Cada classe dos mapas temáticos foi classificada de acordo com o grau de importância em relação ao potencial de favorabilidade de contribuição na distribuição do minério de Ni, embasado no modelo (Figura 10).

Assim, foi elaborada uma tabela atribuindo valores para cada classe dos mapas temáticos, que foram empregados no modelo: a geologia (classes dunito, peridotito e piroxenito), altitude (classe 950 – 1100m), declividade (classe 0-24%), curvatura (classe <0) e aerogeofísica (classes com respostas dos altos valores do IM) foram atribuídos valores igual a 1 (aptos) As outras classes presentes em cada mapa receberam o valor 0 (inaptos). Com os mapas devidamente reclassificados, foi feita uma combinação entre os mesmos, utilizando o operador AND para obter a interseção de valores coincidentes.

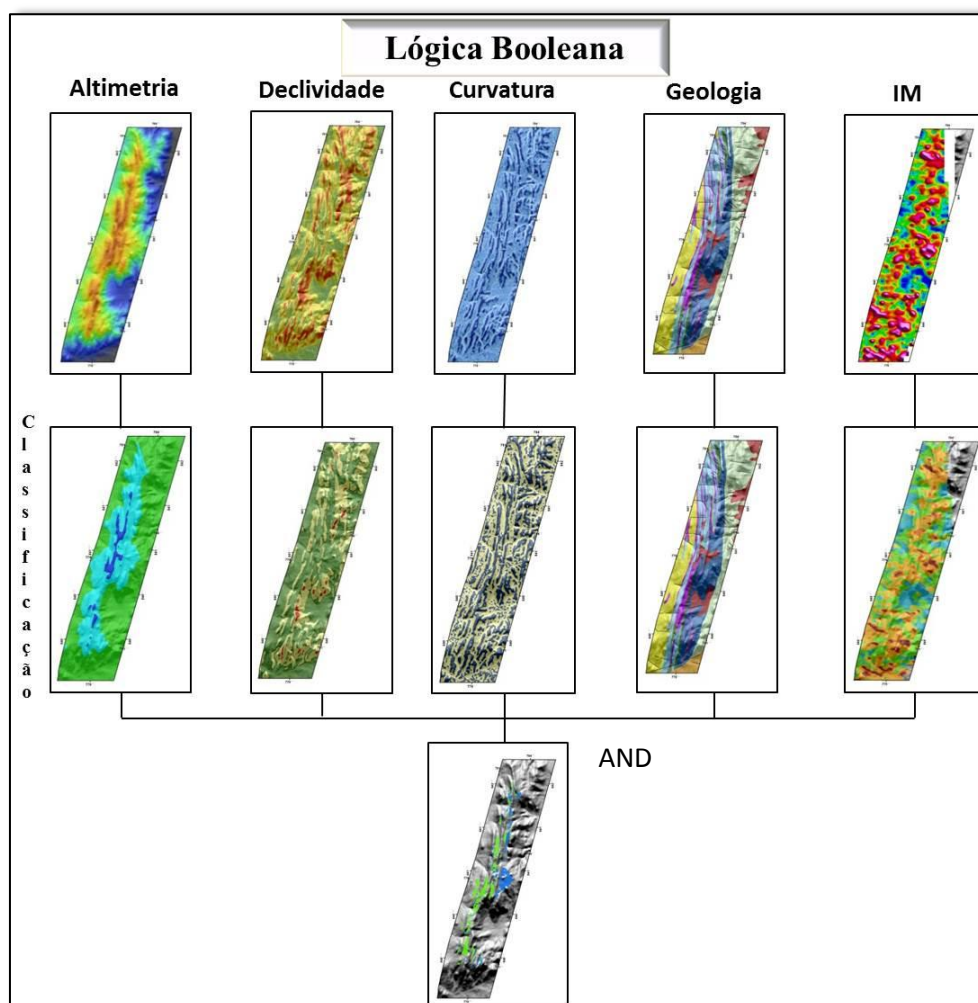


Figura 10 – Fluxograma do modelo booleano do depósito de níquel laterítico.

Assim, foi elaborada uma tabela atribuindo valores para cada classe dos mapas temáticos, que foram empregados no modelo: a geologia (classes dunito, peridotito e piroxenito), altitude (classe 950 – 1100m), declividade (classe 0-24%), curvatura (classe <0) e aerogeofísica (classes com respostas dos altos valores do IM) foram atribuídos valores igual a 1 (aptos) As outras classes presentes em cada mapa receberam o valor 0 (inaptos). Com os mapas devidamente reclassificados, foi feita uma combinação entre os mesmos, utilizando o operador AND para obter a interseção de valores coincidentes.

3.5.4.2. Lógica Fuzzy

A introdução da lógica Fuzzy que trabalha com a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes foi primeiramente introduzida por Zadeh em 1965. Também denominada de lógica difusa, consiste em uma metodologia de caracterização de classes, as quais não têm limites rígidos (bordas) (Câmara *et al.*, 2001). A lógica *fuzzy* (nebulosa) visa manipular informações em um ambiente de incerteza e imprecisão, fornecendo uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento que é inexato e incompleto (Bönisch, 2004). Silva (2001) relata que os limites entre superfícies contínuas não ocorrem bruscamente na grande maioria das vezes. A

lógica *fuzzy* exige que os mapas de evidências sejam representados por uma função nebulosa. Apresenta a capacidade de capturar informações de diversas naturezas e convertê-las em formato numérico. Assim como a lógica booleana, foi elaborada uma tabela de atributos relacionando para cada classe dos mapas temáticos (geologia, altitude, declividade, curvatura e aerogeofísica), entretanto, a variação dos valores foi atribuída de 0 a 1. O procedimento de disposição dos dados de entrada em valores de pertinência *fuzzy* de 0 a 1 é denominado fuzificação (Tsoukalas & Uhrig, 1997).

Para a combinação dos mapas temáticos utilizando à lógica *fuzzy*, podem ser utilizados diferentes operadores (“AND *fuzzy*”, “OR *fuzzy*”, “produto algébrico *fuzzy*”, “soma algébrica *fuzzy*” e “operador *fuzzy* gama”), cada qual apresentando vantagens e/ou desvantagens (Bonham-Carter 1994). O resultado mais interessante corresponde ao “operador *fuzzy* gama” (Bonham-Carter 1994), que possibilita contornar e contrabalancear o efeito minimizante do “produto algébrico *fuzzy*” e o efeito maximizante da “soma algébrica *fuzzy*” (Figura 11). O método *fuzzy* permite fazer previsões quanto aos cenários mais ou menos suscetíveis a um determinado fenômeno, por meio de manipulação dos valores do Índice Gama (γ) (Silva, 2003). An *et al.* (1991) trabalhou utilizando a lógica *fuzzy*, com a integração de dados geofísicos na pesquisa mineral de metais base e formações ferríferas. Carrino *et al.*, (2011) trabalhou com a lógica *fuzzy* na previsão de áreas potenciais à exploração aurífera na Província Mineral do Tapajós.

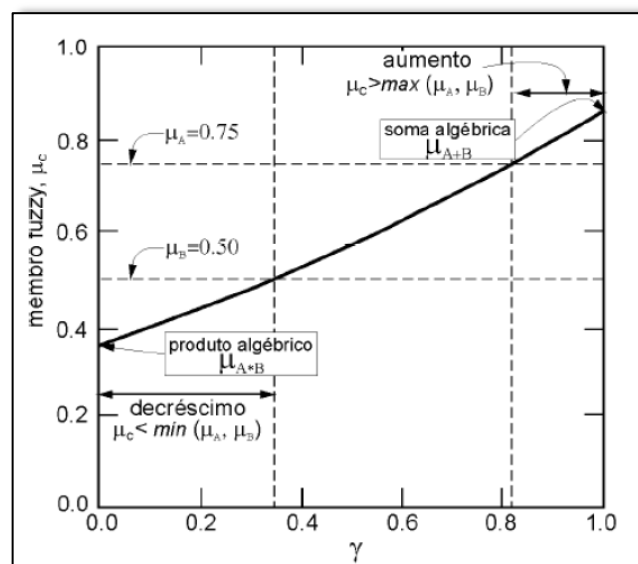


Figura 11 - Distribuição da função *fuzzy* gama para distintos valores de γ (entre 0 e 1). Modificado por Moreira da Silva, 2001.

Para a fuzificação dos dados, foram utilizadas as opções *large* e *small*. A opção *large* atribui altos valores de pertinência aos valores maiores e a opção *small* atribui altos valores de pertinência aos menores valores (Figura 12). Desta forma, os valores de entrada foram transformados em valores de 0 a 1.

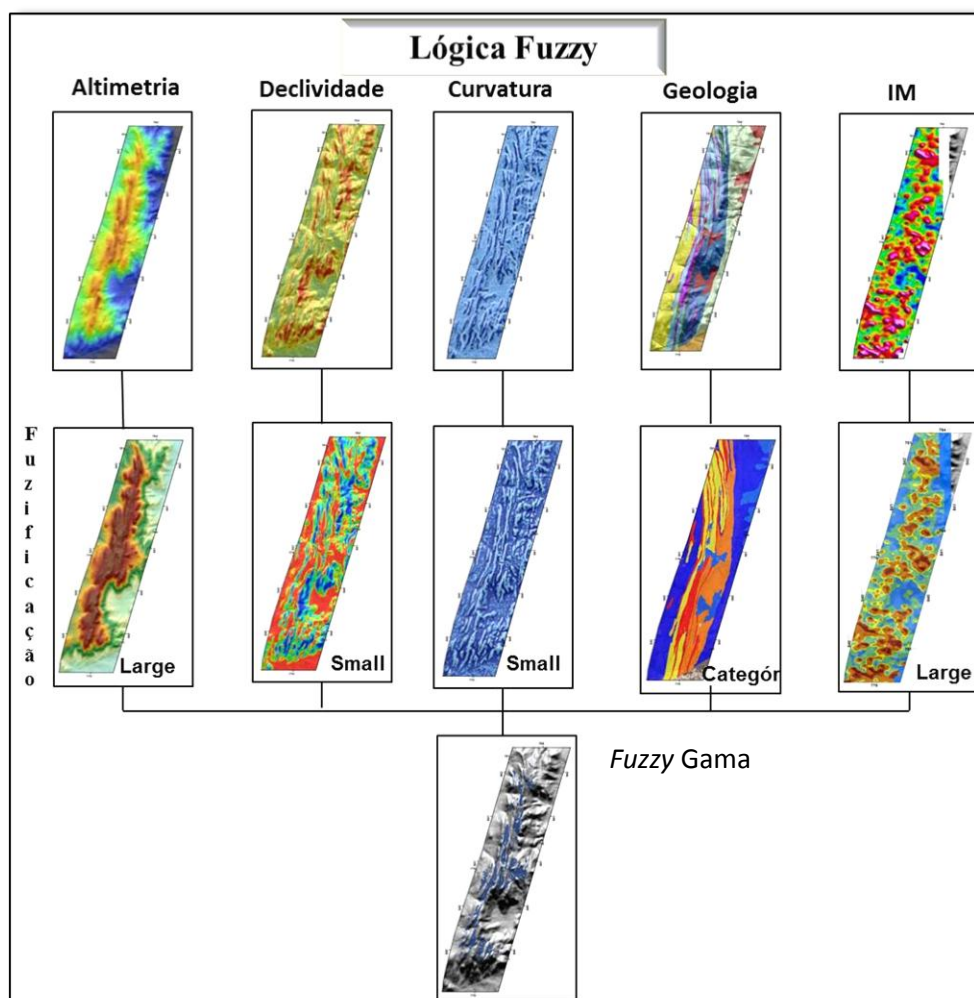


Figura 12 – Fluxograma do modelo *fuzzy* do depósito de níquel laterítico.

Nos mapas de altimetria e índice máfico-ultramáfico, foi utilizada a função *large* e para a declividade e a curvatura, foi utilizada função *small*. A geologia (categórico) foi reclassificada utilizando valores entre 0 e 1, onde os dunitos, perititos e piroxenitos receberam os maiores valores. A lógica *fuzzy* normalmente trabalha com entrada de dados contínuos, quando você deseja usar dados categóricos (geologia) na sua análise é necessária a transformação dos dados para a escala de 0-1. Os mapas gerados foram combinados utilizando o “operador *fuzzy gama*” e índice γ igual a 0,8 obtendo-se o mapa de favorabilidade do depósito de níquel laterítico de Niquelândia. Em geral, valores mais usuais de γ na literatura variam de 0,7 a 0,9.

Operador *Fuzzy Gama* = (soma algébrica *fuzzy*) γ x (produto algébrico *fuzzy*) $1-\gamma$, no qual γ corresponde a um parâmetro escolhido no intervalo de 0 a 1 (Zimmermann & Zysno, 1980). A escolha do valor de γ cabe ao especialista e deve ser função da resposta que este espera obter dos dados

Os resultados obtidos da razão de bandas, do MLME e dos modelos booleano e *fuzzy* foram sobrepostos em imagem Bing Maps, mais recentes. O Bing Maps é um sistema semelhante ao

Google Earth desenvolvido pela Microsoft para visualização interativa de mapas e imagens de satélite presente no ArcGIS 10.

3.6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O uso de unidades de feições geomorfológicas como ferramenta para auxiliar as atividades de mapeamento de depósitos minerais juntamente com a geologia constitui uma evolução no entendimento de suas relações e compreensão na formação de depósitos minerais

Para o entendimento do processo de formação do depósito de níquel laterítico de Niquelândia foi necessário compreender os aspectos geomorfológicos que influenciam, tais como: a altimetria, a declividade e a curvatura do relevo (Figura 13).



Figura 13 – Foto panorâmica do relevo do depósito de níquel laterítico, mostrando feições geomorfológicas da área de estudo. Ao fundo, pode-se ver a mina denominada Fazendinha.

A essas informações, foi adicionado o mapa geológico, bem como os dados extraídos de forma indireta como a aerogeofísica e de imagem de satélite na composição mineralógica da área para criação do modelo de favorabilidade do depósito de níquel laterítico.

3.6.1. Relevo

Na área de estudo ocorre uma variação altimétrica entre 517 a 1.143,5 m (Figura 14a). O fatiamento altimétrico foi definido para separar a unidade onde ocorre a formação do depósito de níquel, baseado em estudos realizados por Costa (1970); Motta *et al.* (1972) e Pedroso e Schumaltz (1981, 1986) onde, geralmente, o depósito de níquel laterítico em Niquelândia encontram-se nas cotas de 950 m a 1100 m (ciano) (Figura 14b).

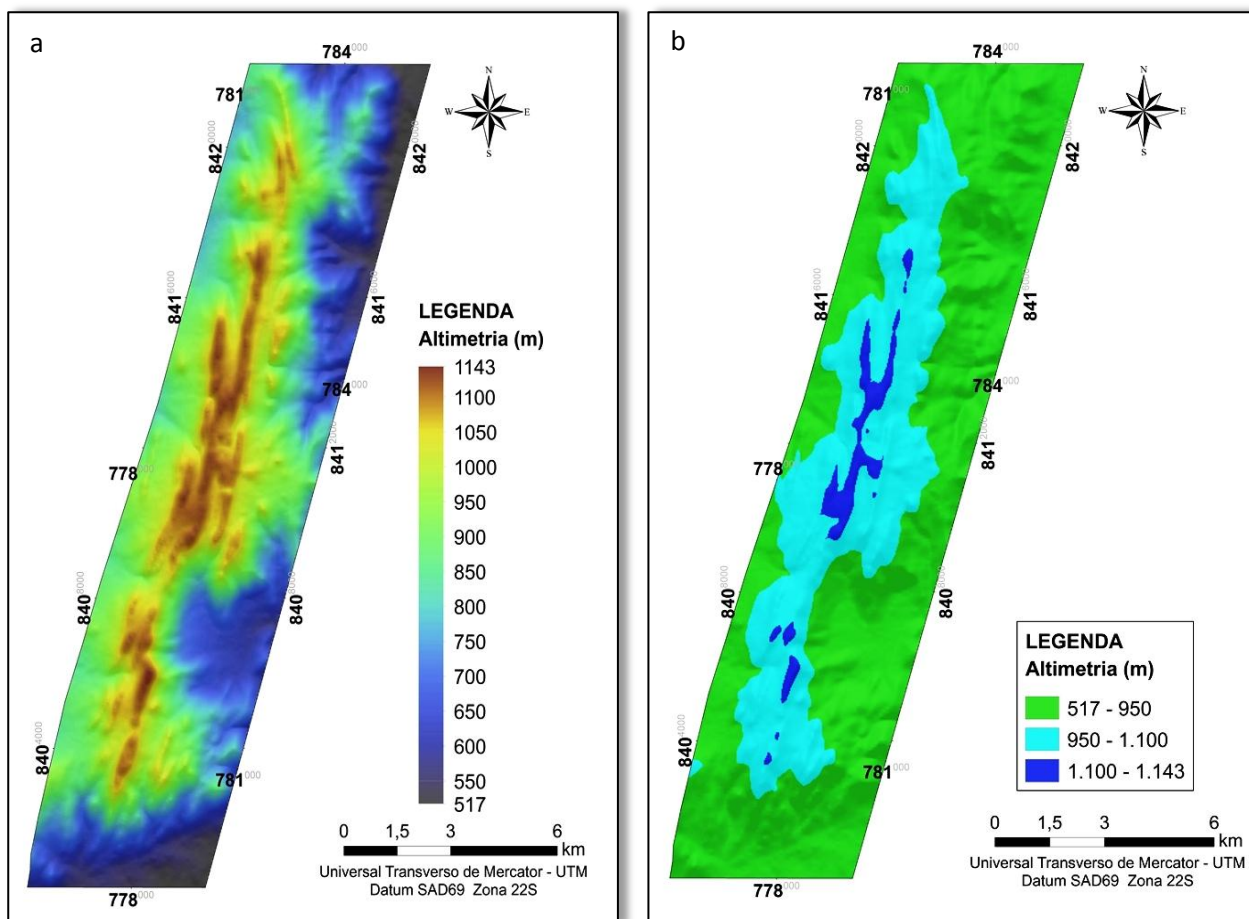


Figura 14- Mapa altimétrico com a variações dos valores presentes na área de estudo (a). Mapa altimétrico reclassificado (b).

A declividade tem papel fundamental em processos pedogenéticos, pois controla diretamente a taxa dos mecanismos de erosão/pedogênese, além dos processos de deposição. O mapa de declividade da área apresenta as classes pré-definidas: 0-24% (verde), 24-45% (amarelo) e >45% (vermelho) (Figura 15a).

O fatiamento foi definido de modo que as áreas que apresentam declividades entre 0-24%. Foram consideradas aptas à formação do depósito de níquel laterítico e as áreas que apresentam declividades acima de 24% inaptas. Essa classe foi definida de acordo com as observações em campo onde se verificou que a formação do perfil de alteração do depósito de níquel laterítico apresenta uma variação na declividade de plano a fortemente ondulado.

O mapa de curvatura da área de estudo foi definido para as seguintes classes: -1,95 – 0 representa a superfície côncava (amarelo), 0 representa superfície plana e 0 – 2,55 representa a superfície convexa (azul) (Figura 15b).

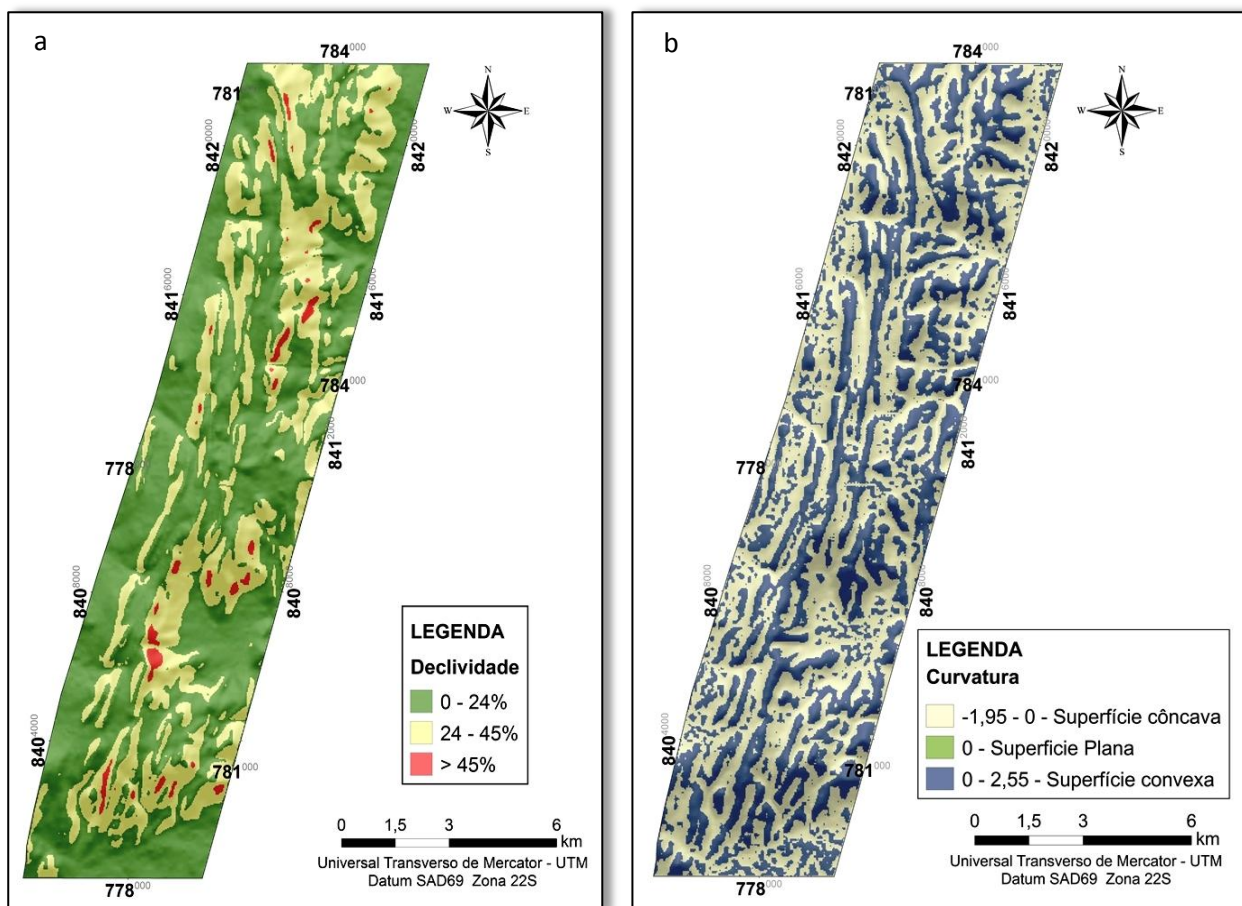


Figura 15– Mapa de declividade (a) e de curvatura (b) da área de estudo.

O mapa de curvatura foi utilizado nesse estudo devido ao tipo de geomorfologia presente no depósito de níquel observada por vários autores entre eles Motta *et al.* (1972); Pedroso e Schumaltz (1981, 1986); Oliveira *et al.* (1992) e Carvalho Junior *et al.* (2004). Esses autores observaram no contexto geomorfológico, que o minério está depositado em “vales suspensos” em piroxenitos balizados por colinas de dunitos sustentadas por calcedônia rica em ferro. Deste modo, verificou-se que vales suspensos são representados pelas superfícies côncavas balizadas entre as cristas sustentadas por calcedônia, caracterizando as superfícies convexas.

3.6.2. Índice Máfico

O processamento e a análise dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos possibilitou a elaboração do Índice máfico (IM), com objetivo de ressaltar a influência do material de origem (rocha) enriquecida em ferro e dos solos enriquecidos em óxidos e hidróxidos de ferro que representa a gênese do minério de níquel laterítico em Niquelândia (Figura 16).

Com a geração do IM verificou-se a delimitação das áreas que está sendo ou já foi explorada em minério rico em níquel na zona ultramáfica do Complexo de Niquelândia, observadas com a presença de valores muito altos a altos (cor magenta e vermelho).

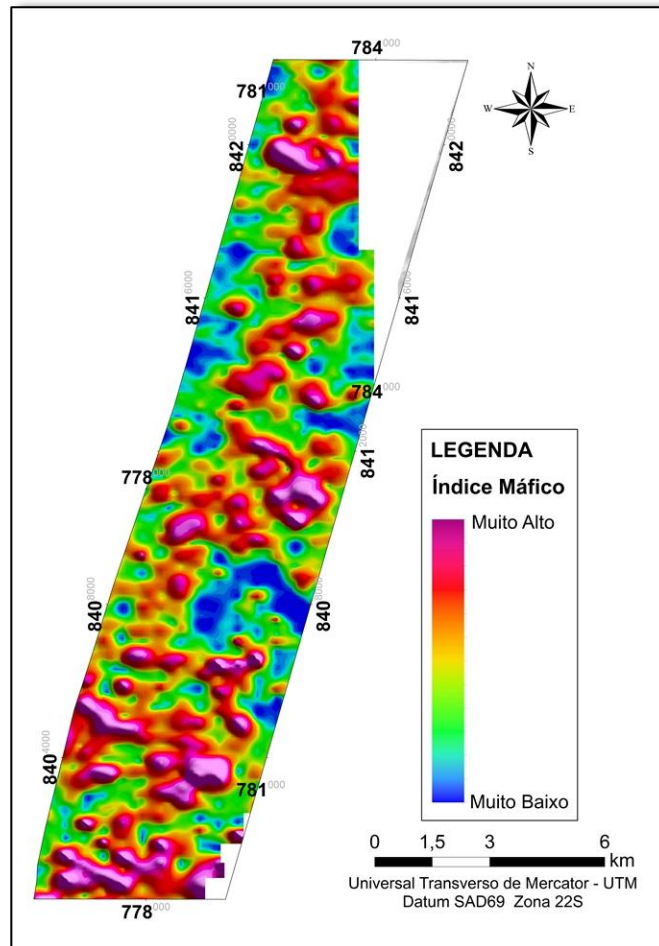


Figura 16 – Índice Máfico-Ultramáfico (IM) apresentado valores muito altos a altos (magenta e vermelho), valores baixo (verde) e valores muito baixo (azul).

O IM refere-se à associação dos dados magnetométricos, por intermédio da associação do ASA e de dados gamaespectrométricos, o ASA salientou a assinatura de fontes magnéticas causada pelo substrato litológico (dunitos, peridotitos e piroxenitos). Já os valores altos no teor do eU e eTh ressaltaram o IM, podendo estar relacionados aos solos ricos em óxidos e hidróxidos de ferro, presentes nas áreas mineralizadas. Isto acontece mesmo com a presença de rochas ferromagnesianas pobres em radioelementos, uma vez que o eU e eTh apresentam menor mobilidade em relação ao K, e quando liberados durante o intemperismo, são adsorvidos nos minerais de argila ou co-precipitados com óxidos e hidróxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.*, 1997).

A formação da jazida de níquel laterítico em Niquelândia é causada por processos pedogenéticos, promovendo o enriquecimento de Fe^{+3} na superfície, associado às coberturas detrito-lateríticas ferruginosas. Portanto, a combinação de dados aerogeofísicos com a utilização das respostas mais superficiais (eU e eTh) e do material de origem (dunitos, peridotitos e piroxenitos) obtidos dos dados magnetométricos (ASA) teve uma resposta positiva na obtenção de um Índice Máfico com uma melhor delimitação de áreas com ocorrência do minério de níquel laterítico.

3.6.3. Sensoriamento Remoto

3.6.3.1. Razão de Bandas

No processamento digital da imagem ASTER de 2001, a razão de bandas Fe^3/Fe^2 realçou áreas ricas em hematita e uma possível correlação com ocorrências minerais de Ni baseado no perfil de intemperismo do depósito de níquel laterítico de Niquelândia (Figura 4). A razão de bandas permitiu eliminar superfícies enriquecidas em íons ferrosos (Fe^{2+}) que ocorrem nos minerais magnetita e maghemita e realçar as áreas ricas em íons férricos (Fe^{3+}) presentes nos minerais hematita e goethita (Schumacher, 1996). O perfil de intemperismo mineralógico do depósito de níquel de Niquelândia, de forma simplificada, apresenta pimelita e goethita na base e, à medida que se dirige para o topo, observa-se um aumento da quantidade de hematita, caulinita e calcedônia rica em ferro (Pedroso e Schumaltz, 1981; Oliveira *et al.*, 1992; Carvalho Junior *et al.*, 2003).

A composição colorida RGB – das bandas 2, 3 e 1 da imagem do sensor ASTER 2001 (Figura 17a) mostra áreas onde estão ocorrendo exploração de níquel laterítico. Os dados obtidos com a razão de bandas Fe^3/Fe^2 , extraído da imagem do sensor ASTER 2001, foi sobrepostos a uma o Modelo Digital de Terreno e as cavas das minas (Figura 17b).

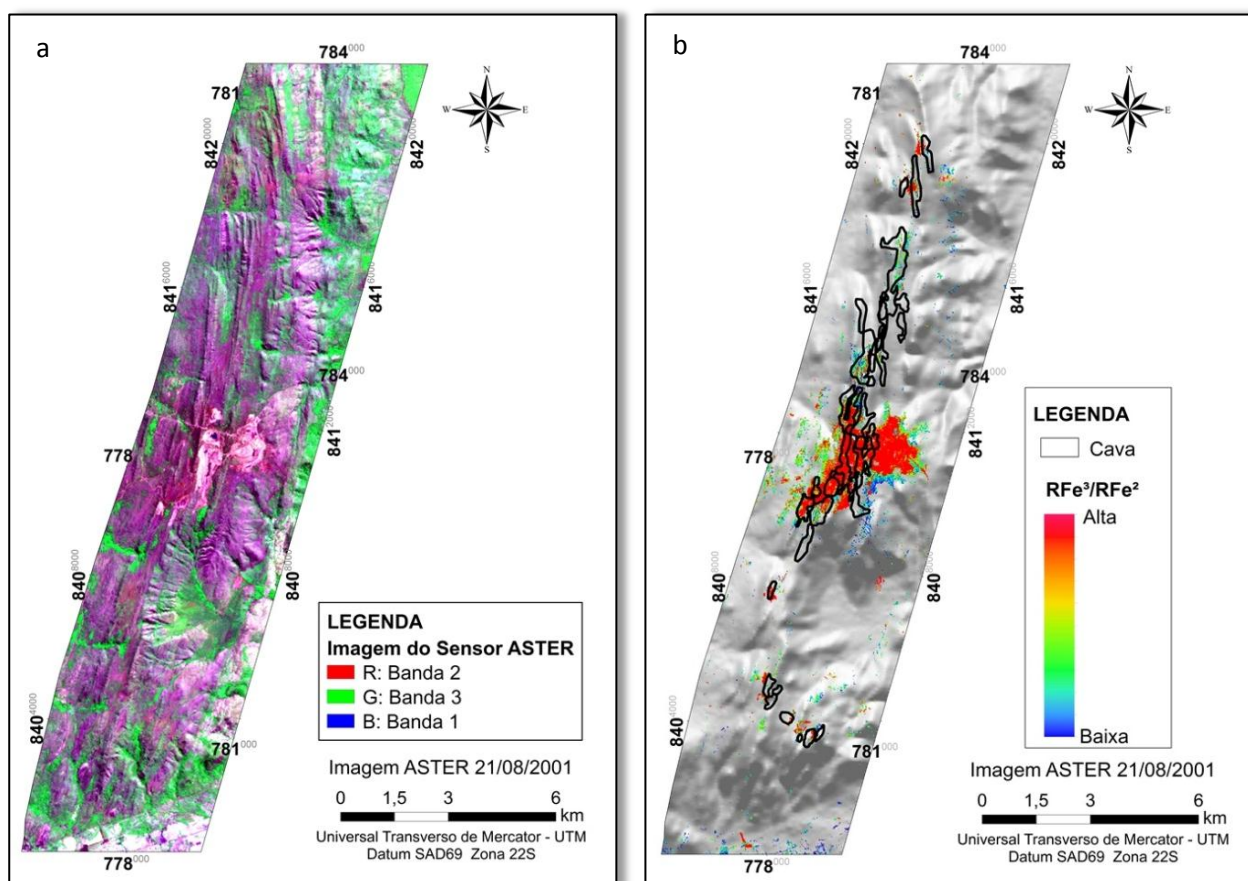


Figura 17 - Imagem do sensor ASTER de 2001 com composição RGB231 (a). Modelo Digital de Terreno com sobreposição da razão de bandas $\text{RFe}^{3+}/\text{RFe}^{2+}$ e cavas da mina de níquel laterítico (b).

Pode-se observar que a resposta espectral do Fe^{3+} , extraída da imagem do sensor ASTER de 2001, realçou as áreas em prospecção e lavra do minério de níquel e confirmada pela sobreposição

das cavas da mina. Assim, um indicativo de possíveis áreas com potencial para extração do minério de níquel pode ser baseado no topo do perfil de alteração do depósito de níquel que apresenta-se rico em Fe^{3+} . Apesar da técnica de razão de bandas constituir-se em um processamento simples de ser realizado, ela mostrou muito eficiente na discriminação dos materiais superficiais ricos em Fe^{3+} (vermelho).

3.6.3.2. Mapeamento Espectral

Com as assinaturas espectrais extraídas das amostras coletadas dos minérios oxidado, silicatado e do horizonte A do solo ao longo de perfil de alteração apresentadas nas figuras 18a, 18b e 18c da área de prospecção mineral em Niquelândia foi possível à individualização das mesmas.

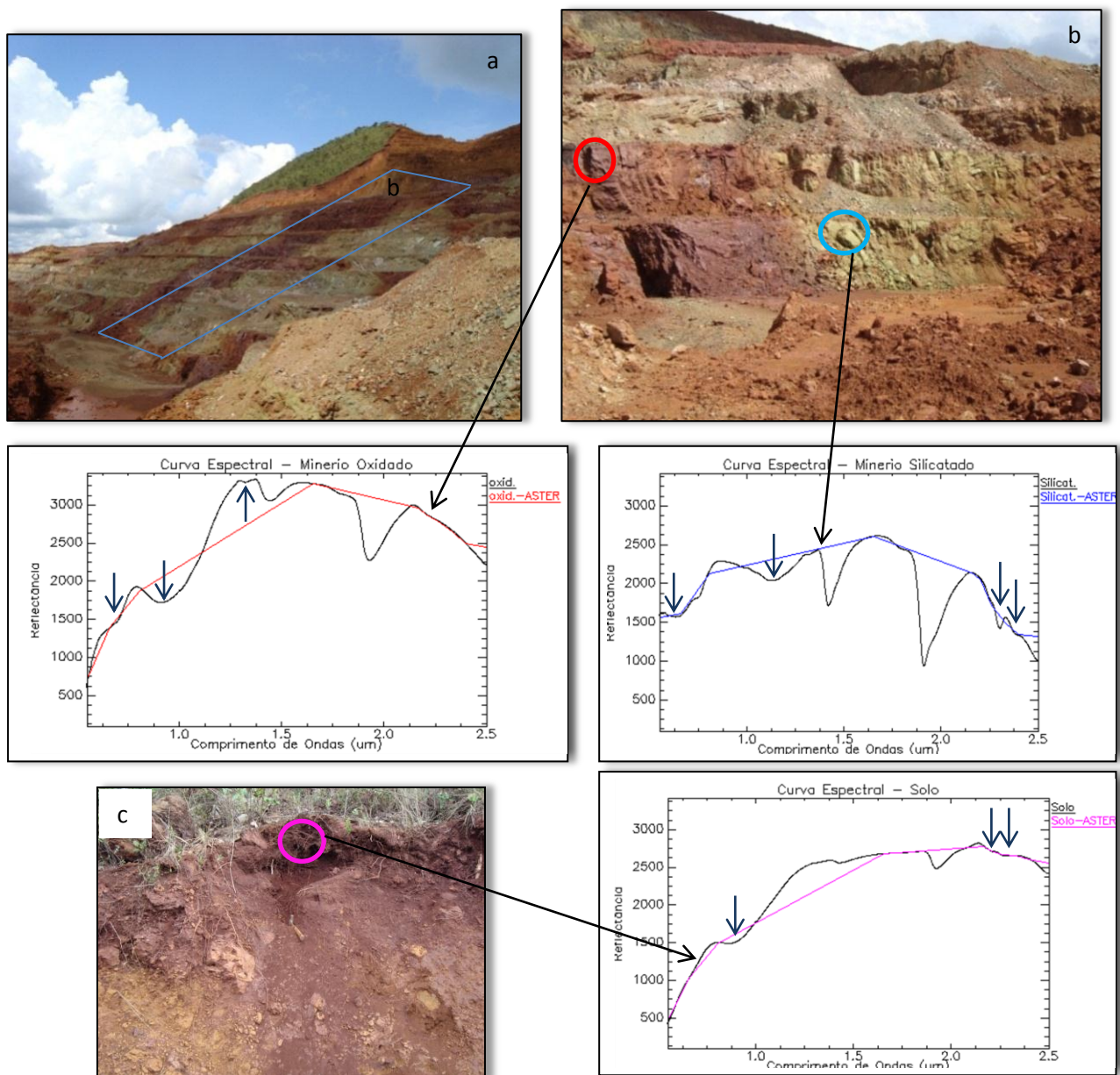


Figura 18 - Perfil de alteração do depósito de níquel laterítico de Niquelândia (perfil de detalhe em azul) (a). Perfil de alteração detalhada com indicação das amostras e curvas espectrais dos minérios oxidados, silicatado (b). Perfil do solo e respectiva curva espectral da amostra do horizonte A (c).

Estudos utilizando dados espectrorradiométricos estão geralmente relacionados aos minerais presentes em processos hidrotermais (Crósta, *et al* 2003; Ducart *et al.*, 2004). O processo para a individualização dos minérios de oxidado e silicatado e do solo com uso das curvas espectrais, aplicadas sobre a imagem do sensor ASTER 2001, foi com utilização do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

A curva espectral da amostra do minério oxidado apresentou feições de absorção em 0,65 μm , 0,91 μm e 1,32 μm . A resposta espectral do solo apresentou feições de absorção em 0,51 μm , 0,88 μm e 2,2 μm e 2,26 μm (Figura 18b). Sherman & Waite (1985) descreveram feições espectrais da hematita provenientes de transições eletrônicas de campo cristalino em 0,55 μm , 0,65 μm e 0,885 μm , as quais se diferenciam da goethita que apresenta feições em 0,48 μm , 0,65 μm e 0,917 μm . A característica mais geral da forma dos espectros neste intervalo de comprimento de onda é a abrupta queda da reflectância a partir do início do infravermelho próximo em direção ao visível, bastante conhecida como uma feição espectral das rochas ferro-oxidadas por processos intempéricos (Meneses *et al.*, 2001). Assim, o minério oxidado tem feições espectrais características da goethita.

As curvas espectrais das amostras do solo e do minério oxidado, quando reamostradas para resolução espectral da imagem do sensor ASTER, apresentaram características espectrais parecidas na região do VNIR e SWIR em 0,65 μm , 2,16 μm , e 2,39 μm . O solo apresentou também feições espectrais na região do SWIR de 2,26 μm e 2,33 μm . A presença da feição de absorção em 2,2 μm pode estar relacionada com a presença de caulinita e/ou montmorilonita. A caulinita é identificada pela dupla feição de absorção proveniente da ligação Al-OH em 2,2 μm (Hunt *et al.*, 1971). Pela presença das assinaturas espectrais em 0,51 μm e 0,92 μm e 2,26 μm , o solo apresenta, em sua composição, minerais rico em Fe^{3+} e argilominerais (caulinita). Para identificação mineralógica das amostras do minério oxidado e do solo, foi realizada análise de Raios-X. O resultado obtido mostrou a presença de hematita, goethita e magnetita no minério oxidado. Já o solo apresentou-se constituído por: hematita, goethita e caulinita. Solos muito intemperizados são compostos por óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita) e alumínio (gibbsite) e caulinita.

Segundo Carvalho Junior *et al.* (2003), o mineral silicatado pimelita apresenta coloração esverdeada. Para o topo, o Fe-saponita e óxido de ferro que dão uma coloração amarronzada ao longo do perfil de alteração. A transição da fácies silicatada para a oxidada ocorre em um intervalo de poucos metros.

O minério silicatado de Niquelândia analisado apresenta feições de absorção em 0,613, 1,115 μm , 2,30 μm e 2,38 μm , além das bandas de absorção ocasionadas pela presença de água na estrutura mineral em 1,40 μm e 1,90 μm concordando com observações realizadas por Carvalho Junior *et al.* (1998) (Figura 18b). Pode-se verificar a presença da banda de absorção situada entre 2,30 μm e 2,38 μm , região do espectro que corresponde à ligação Mg-OH presente nas garnieritas

niquelíferas (pimelita) (Carvalho Júnior *et al.*, 1998). A presença da ligação Mg-OH, presente nas garnieritas niquelíferas (pimelita), ocorre em 2,30 μm aproximadamente (Carvalho Júnior *et al.*, 1998). A pimelita é um argilomineral 2:1 do grupo da esmectita (Santos, 1989). A faixa de absorção da curva espectral do Mg-OH apresenta entre 2,30-2,36 μm (Cruz *et al.*, 2011). O minério silicatado, quando reamostrado para imagem do sensor ASTER, apresentou feições espectrais similares ao do solo e minério oxidado, porém, apresentou diferenciação na feição espectral 2,38 μm . Assim, conclui-se que a presença de óxidos de ferro na gênese superficial do minério de níquel faz com que o mineral silicatado seja mascarado pelas feições de absorção proporcionadas pelos minerais portadores de Fe^{+3} na região do VNIR (Carvalho Júnior *et al.*, 1998).

A aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) possibilitou a individualização dos minérios oxidado e silicatado e do horizonte A solo na área de estudo. Com o resultado foi feita uma composição colorida RGB – oxidado, silicatado e solo (Figura 19) para identificar a distribuição das amostras na área de estudo. Também foi feita uma análise espectral de cada banda para observar a proporção de amostras estão presentes na área de estudo e cujo o resultado esta presente nas Figuras 19b e 20.

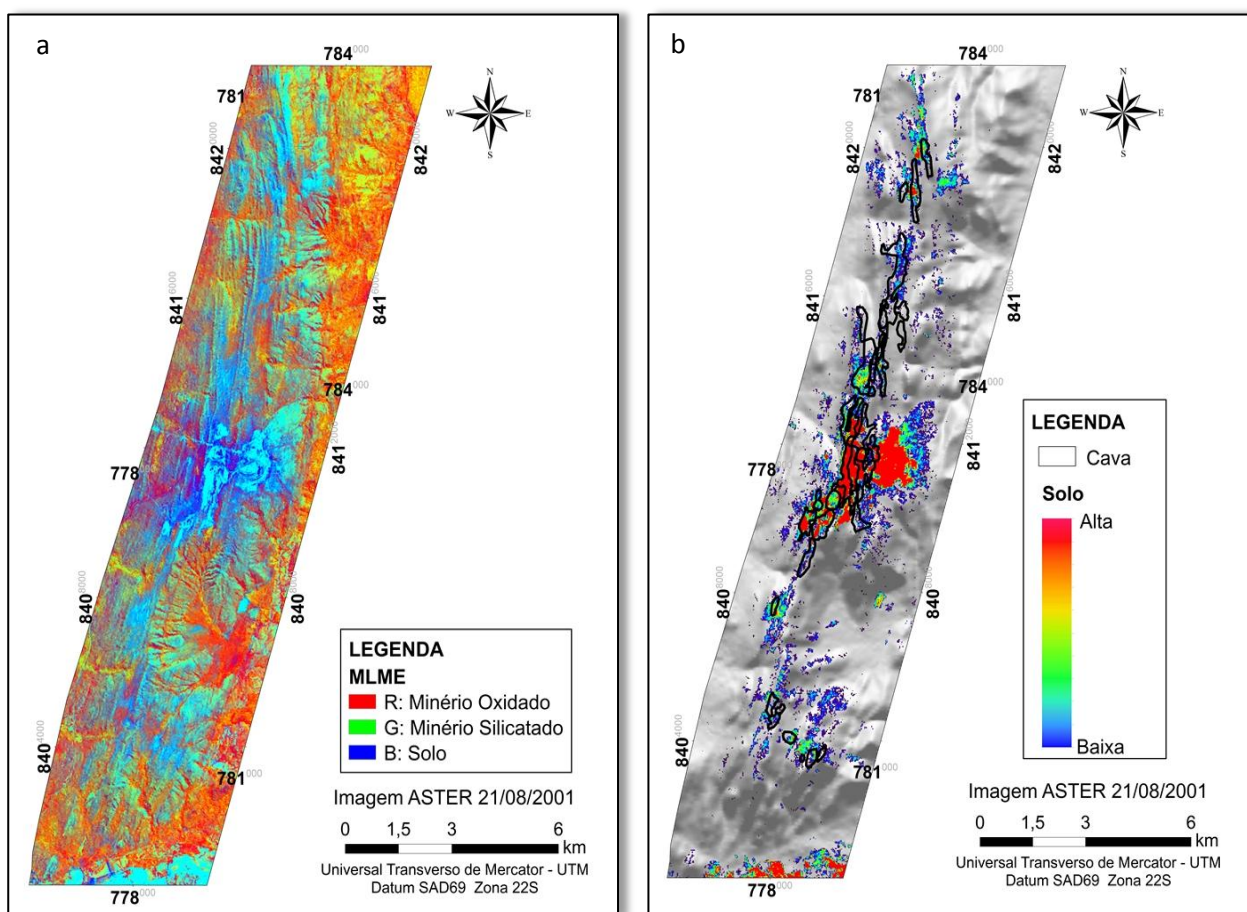


Figura 19 – MLME em composição colorida RGB – oxidado, silicatado e solos (a). Modelo Digital do Terreno (MDT) com sobreposição da banda do solo extraído do MLME e cavas com extração do minério de níquel (b).

A composição colorida RGB – oxidado, silicatado e solos (Figura 19a) mostra predominância das cores ciano e azul indicando nas áreas em azul uma maior resposta espectral do solo, e na cor ciano, uma mistura espectral entre o solo e o minério silicatado. Analisando as bandas espectrais obtidas pela MLME, separadamente, verificou-se que a amostra do solo teve uma resposta espectral predominante sobre a curva espectral do minério oxidado. A curva espectral do minério oxidado, quando utilizada junto com a do solo, tem sua resposta espectral mascarada. Isso foi observado durante a análise dos dados, isoladamente, utilizando a combinação das curvas espectrais: minérios oxidados e silicatado, minério oxidado e solo e minério silicatado e solo. Quando as curvas espectrais do solo e do minério oxidado são separadas nas combinações, suas respostas espectrais são muito semelhantes. O motivo principal é que as feições espectrais são muito similares com apenas uma variação em 2,2 μm presente na curva espectral do solo, provavelmente, proveniente da ligação Al-OH.

O MDT com sobreposição da banda do solo extraído do MLME (Figura 19b), extraída da imagem ASTER de 2001, e com as cavas da mina destacou a área de maior exploração mineral mapeada pela curva espectral do solo.

Quanto à identificação do minério silicatado, apresentaram-se algumas feições na área da exploração mineral (Figura 20).

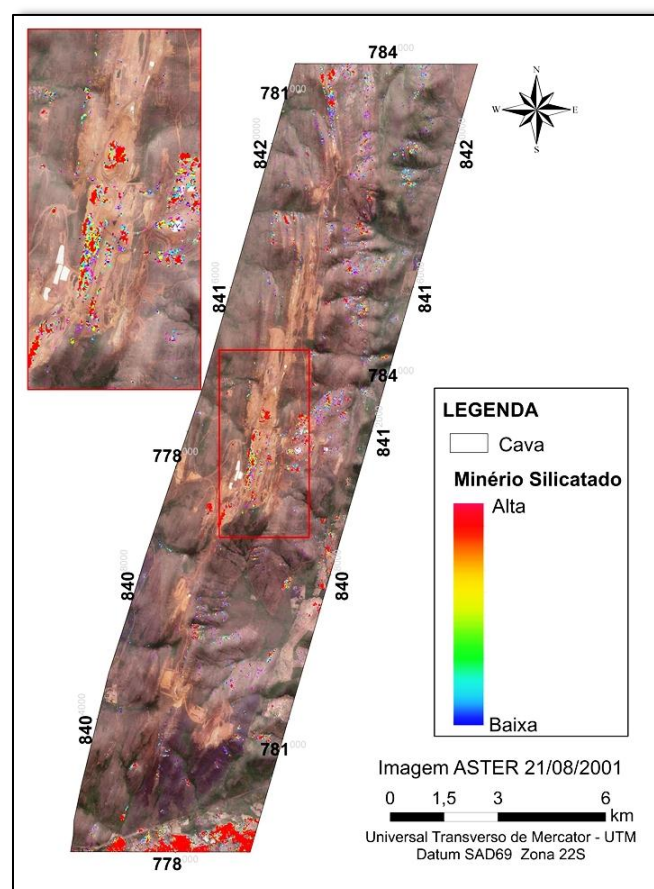


Figura 20 - Imagem Bing Maps com sobreposição da banda do minério silicatado extraído do MLME.

A imagem Bing Maps com sobreposição da banda do minério silicatado extraído do MLME (Figura 20) destacou a área de maior exploração mineral localizada no perfil de intemperismo. Isso deve-se pela gênese de formação do minério visto que ele se apresenta abaixo da superfície, portanto estando exposto só na área que está sendo lavrada. Portanto, o MLME se mostrou uma ferramenta eficiente visto que tem sido aplicado com sucesso no mapeamento mineralógico (Adams, *et al.*, 1995; Bryant, 1996). Baptista & Meneses (2009) obtiveram bons resultados utilizando o MLME na identificação e decomposição espectral linear dos dois principais sesquióxidos de ferro da fração argila dos solos tropicais: hematita e goethita.

Comparando os resultados obtidos pelo MLME, que utilizou as curvas espectrais do solo e do minério oxidado e o resultado da razão bandas $R_{Fe^{3+}}/R_{Fe^{2+}}$ (Figura 17b), constatou-se que ambos os processamentos digitais de imagem obtiveram respostas muito similares na identificação de alvos ricos em Fe^{3+} .

3.6.4. Modelo de Distribuição do Depósito de Níquel Laterítico

A partir dos mapas temáticos utilizados e descritos previamente, foram aplicados dois tipos de técnicas para modelamento: booleana e *fuzzy*. Os resultados obtidos com imagem sensor ASTER (Fe^{3+} , silicatado) não foram utilizados no modelamento, pois apesar terem tido uma boa resposta no mapeamento, não apresentou um dado possível de ser usado, visto que estão muito segmentado. Entretanto, ele serviu para a validação dos métodos aplicados na delimitação dos depósitos de níquel laterítico aliado aos limites das cavas das minas de níquel. Há que se destacar que tanto a imagem de satélite ASTER de 2001 quando o Modelo Digital de Terreno de 2000 não apresentaram influência sobre a modificação geomorfológica e a mineralógica superficial, pois nessas datas ocorreram poucas mudanças na paisagem onde ocorre ou ocorreu extração de níquel laterítico.

3.6.4.1. Lógica Booleana

Na análise booleana, foram considerados os seguintes fatores: relevo (altimetria, declividade e curvatura), geologia e aerogeofísica. As unidades geológicas que tiveram maior influência na modelagem foram o dunitos, peridotitos e piroxenitos baseado na descrição da gênese do depósito de níquel laterítico, segundo Pedroso e Schumaltz (1981, 1986); Oliveira *et al.* (1992); Colin *et al.* (1990).

O resultado obtido da lógica booleana pode ser visualizado na Figura 21 onde foi sobreposto as cavas das minas de níquel laterítico para analisar a concordância entre as áreas que estão ou tiveram em processo de lavra, sobre os resultados obtidos. O modelo booleano destacou a influência das rochas na formação do depósito de níquel laterítico: piroxenito (verde), dunito (azul) e peridotito (laranja).

A utilização das variáveis altimetria, declividade e curvatura no modelo mostraram-se satisfatórias, uma vez que refinaram a definição da forma e dos limites das áreas. Isto é

consequência do papel fundamental que a geomorfologia tem na formação do perfil de alteração e gênese do minério de níquel laterítico aliado ao processo de lixiviação das rochas ultramáficas.

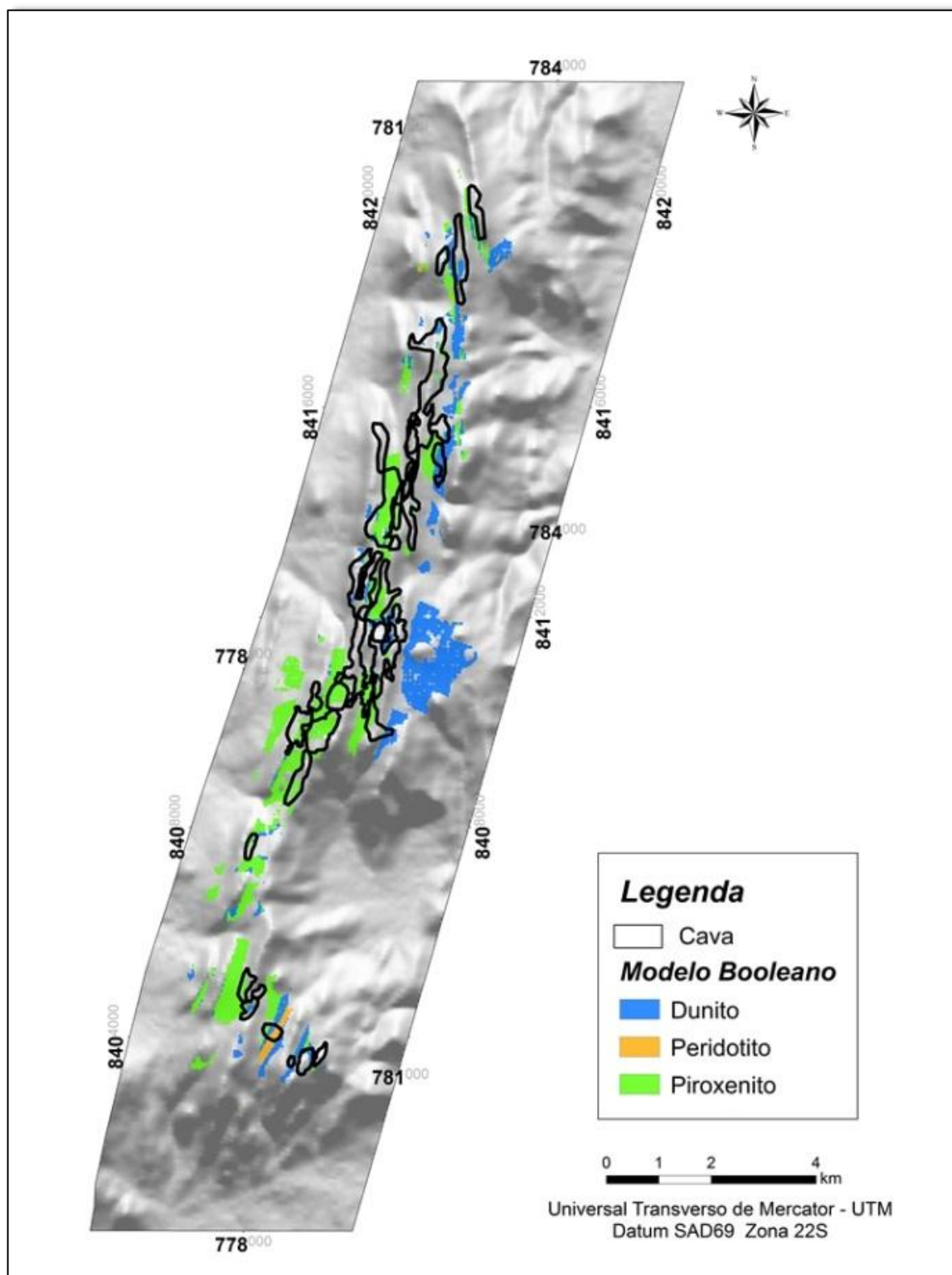


Figura 21 - Modelamento do potencial na distribuição do minério de níquel de Niquelândia, gerado pela lógica booleana disposto sobre MDT com as cavas das minas.

Um mapa foi gerado com a composição dos resultados obtidos da lógica booleana e da curva espectral do solo pelo MLME (Figura 22).

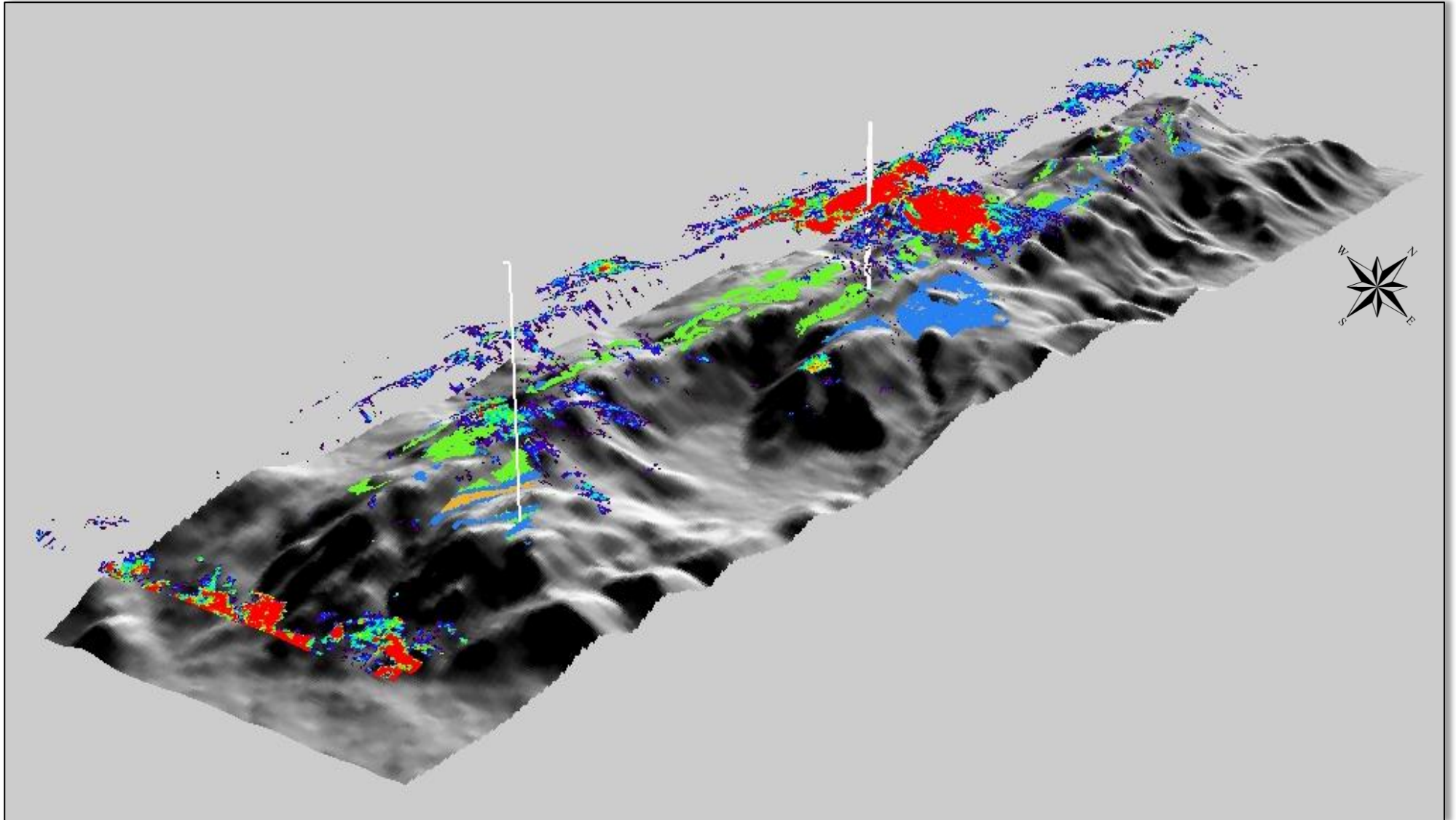


Figura 22 - Sobreposição do resultado da curva espectral do solo obtida pela MLME sobre o modelo booleano e MDT.

O resultado apresentou uma boa correlação com o modelamento do depósito de minério de níquel, já que a gênese deste está relacionada em superfície com áreas enriquecidas em minerais de ferro (hematita e goethita).

O método booleano mostrou-se uma ferramenta de fácil uso e adequado na identificação das áreas com depósitos de minério de níquel laterítico, porém, a rigidez das combinações qualitativas das variáveis, onde só pode ser verdadeiro ou falso, não possibilitou uma discriminação mais detalhada com limites estáticos dos depósitos de níquel laterítico.

3.6.4.2. Lógica *Fuzzy*

Na análise *Fuzzy*, foram considerados os mesmos parâmetros da lógica booleana: relevo (altimetria, declividade e curvatura), geologia e aerogeofísica.

Foi possível identificar as áreas de favorabilidade (azul), sendo o resultado coerente quando sobreposto as cavas da mina de níquel laterítico (Figura 23). Deste modo, verificou-se que há concordância das áreas que estiveram em processo de lavra sobre os resultados obtidos no modelo *fuzzy*. A lógica *fuzzy* apresentou melhor distribuição das áreas de favorabilidade na ocorrência de níquel laterítico, pois apresentou uma maior flexibilidade na análise qualitativa das variáveis. Com o resultado, obteve-se uma discriminação mais detalhada.

Um mapa foi gerado com a composição dos resultados obtidos com a lógica *fuzzy* e do mapeamento espectral do solo por meio do MLME (Figura 24). O resultado apresentou uma boa correlação com o modelamento do depósito de níquel, que também foi observado na lógica booleana, uma vez que a gênese do depósito está relacionada ao processo pedogenético na formação do perfil de alteração com enriquecimento no topo de minerais de F^{3+} (hematita e goethita).

Portanto, analisando as lógicas booleana e *fuzzy*, pode-se afirmar que a simplicidade do método booleano é um aspecto positivo, entretanto este método apresenta limites rígidos e não dá o devido peso a cada critério como a lógica *Fuzzy*, que obteve uma maior abrangência no mapeamento. Entretanto, na lógica *Fuzzy*, a resposta obtida depende da escolha do valor dado para γ , pois valores baixos indicam uma maior contribuição do produto algébrico *Fuzzy*, resultando em mapeamento mais restrito. Valores mais altos de γ irão resultar em um mapeamento com maior distribuição em áreas aumentando assim o número de alvos. Bonham-Carter (1994) apontou que os valores do intervalo $0,8 < \gamma < 1,0$ apresentam um caráter “aumentativo”, em que o valor de saída será maior ou igual ao valor do maior membro *fuzzy* de entrada, e os valores do intervalo $0,35 < \gamma < 0,8$ não se enquadram nem como “aumentativo” nem como “diminutivo”. Os valores de saída, neste caso, cairão sempre entre os valores menores e maiores de entrada. Para Burrough *et al.* (1992), a lógica *fuzzy* é mais flexível que a lógica booleana porque a interseção Booleana aceita apenas intervalos rígidos e algumas áreas são rejeitadas. Assim a lógica *fuzzy* apresenta uma variável contínua e é claramente a melhor aproximação da realidade que a classificação booleana rígida.

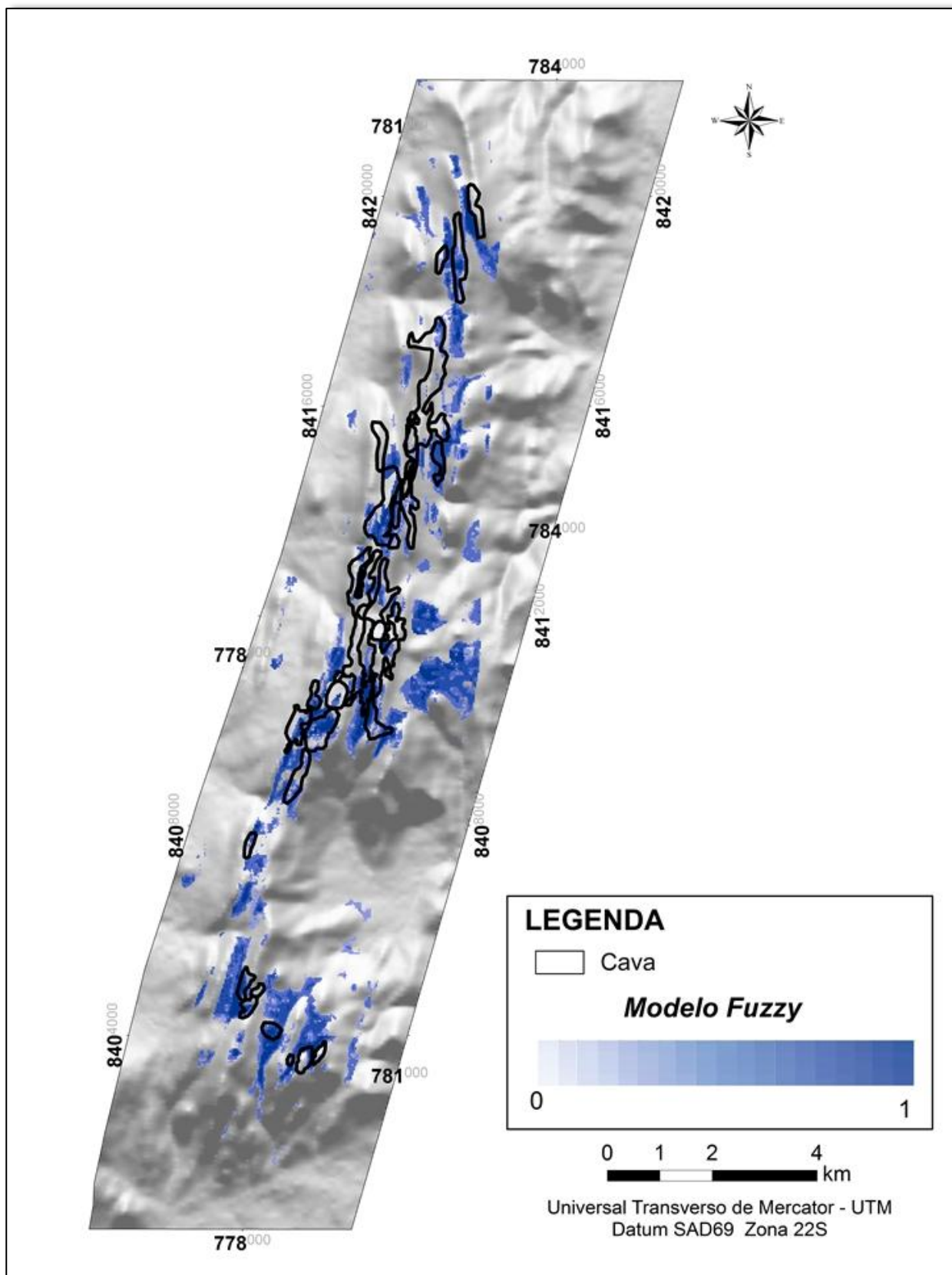


Figura 23 - Modelamento do potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico de Niquelândia gerado pela lógica *fuzzy* sobreposto ao MDT com as cavas das minas. Mostra a variação de 0 (muito baixa) a 1 (muito alta) do potencial de favorabilidade do níquel laterítico.

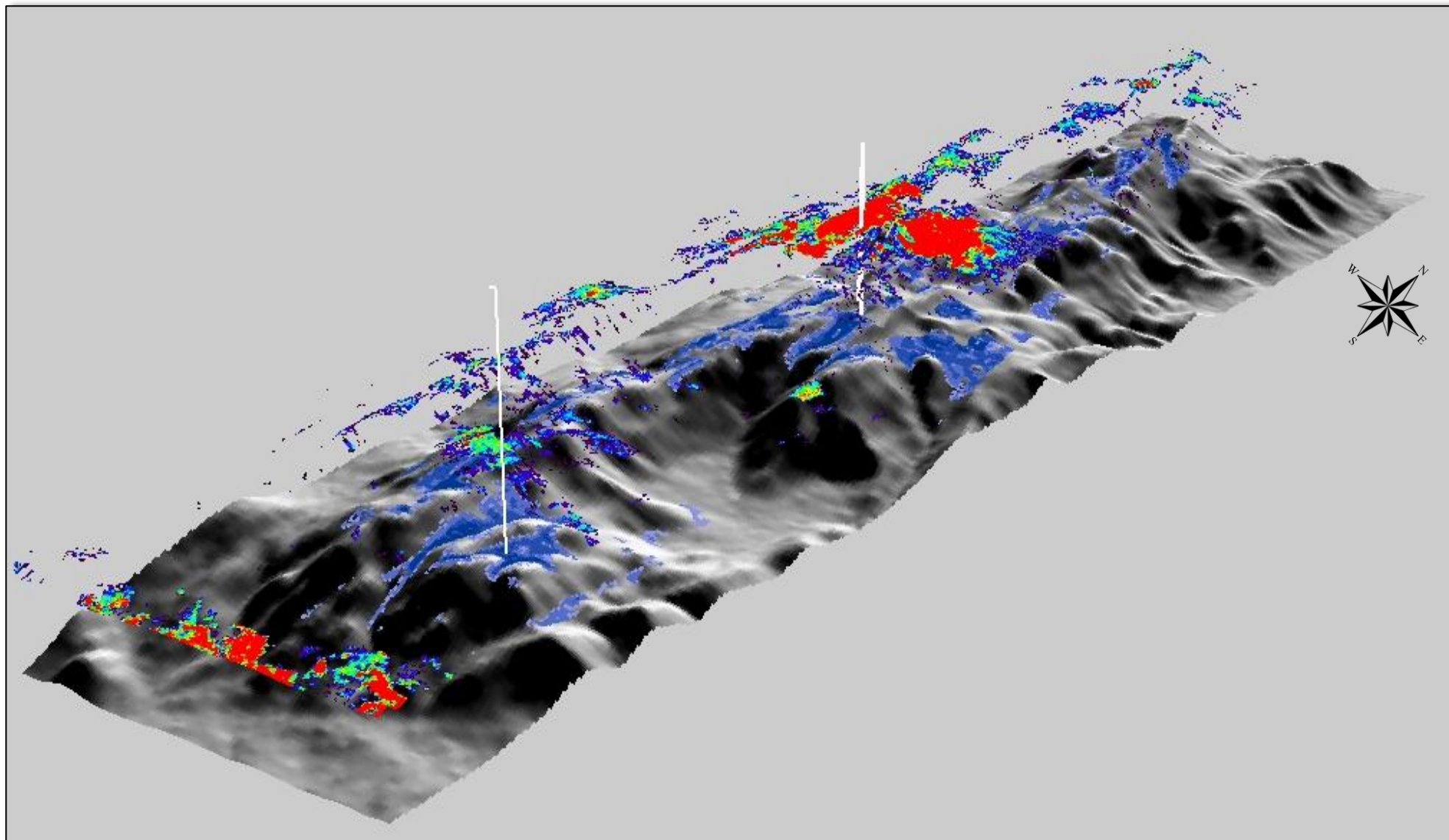


Figura 24 – Sobreposição do resultado da curva espectral do solo obtido pelo MLME sobre o modelo fuzzy e MDT.

3.7. CONCLUSÕES

A utilização de dados geomorfológicos (altimetria, declividade e curvatura) constituíram fatores importantes no detalhamento e definição das formas e limites das áreas favoráveis à prospecção de minério de níquel laterítico em Niquelândia, GO, visto que a geomorfologia tem papel fundamental na evolução do perfil de alteração das rochas máficas-ultramáficas, favorecendo a concentração pedogenética de níquel laterítico, tanto em óxidos e oxihidróxidos de ferro quanto em minerais silicatados (pimelita).

Com a utilização da curva espectral do minério silicatado, com o emprego MLME, obteve-se uma resposta nas porções onde se encontram em processo de lavra na área estudada, visto que no perfil de intemperismo laterítico a formação do minério silicatado de níquel ocorre abaixo do horizonte do ferro representado pelo minério oxidado. Assim a identificação só ocorre quando o perfil rico em minério silicatado apresenta-se exposto.

Áreas favoráveis à prospecção de níquel laterítico utilizando razão de bandas e MLME apresentou uma boa ferramenta na validação dos dados obtidos pelos métodos booleana e *fuzzy*, pois os resultados obtidos foi baseado na análise do perfil de alteração do níquel laterítico onde a porção mais superficial apresenta-se rico em Fe^{3+} . Assim indicando que a utilização de dados extraídos de curvas espectrais em imagem de satélite é uma boa alternativa na obtenção, de forma rápida, resposta nas áreas prováveis para mineralização.

O Índice Máfico apresentou-se eficiente no mapeamento das rochas ultramáficas, portadoras de minerais com níquel, particularmente quando resultou da combinação de dados magnetométricos (ASA) com os gamaespectrométricos (eU e eTh). A individualização destas rochas foi fundamental no modelamento do potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico na área estudada. Devido à atuação dos processos pedogenéticos nestas proporcionou a concentração do níquel nos minerais oxidados e silicatados, responsáveis pelo processo de mineralização do níquel laterítico, onde o minério oxidado localiza-se no topo do perfil de alteração. Assim, a integração do Índice Máfico com os dados geomorfológicos e geológicos permitiram o modelamento do potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico em Niquelândia, GO.

O processamento digital da imagem do sensor ASTER, mostrou que a razão de bandas RFe^{3+}/RFe^{2+} , mesmo sendo considerada uma técnica simples, se apresentou muito eficaz na análise da cobertura enriquecida em óxidos de ferro (hematita e goethita), possibilitando a individualização do minério de níquel oxidado na área estudada em Niquelândia.

O emprego da ferramenta MLME (Mistura Linear de Mistura Espectral), com a utilização das curvas espectrais do solo, minérios oxidado e silicatado, que representa uma metodologia mais apurada na discriminação dos diferentes tipos de minérios (oxidados e silicatados), evidenciou as áreas com predomínio de minerais ricos em Fe^{3+} .

Os resultados obtidos com essas duas técnicas de processamento digital de imagens mostrou-se similar, uma vez que o minério O emprego do MLME, foi eficiente na identificação do minério silicatado somente nas porções da área estudada que já se encontram em processo de lavra onde o horizonte do perfil enriquecido neste minério apresenta-se exposto.

As áreas favoráveis à prospecção de níquel laterítico foram individualizadas na área de estudo utilizando processamento digital de imagens do sensor ASTER, tanto a razão de bandas, quanto o MLME, apresentou-se como uma boa ferramenta na validação do modelamento do potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico de Niquelândia, gerado pelos métodos booleano e *fuzzy*. Os resultados obtidos no modelamento foi baseado na análise do perfil de alteração do níquel laterítico, onde a porção mais superficial apresenta-se enriquecido em minerais de Fe^{3+} . Constatou-se, que a utilização de dados extraídos de curvas espectrais em imagem de satélite do sensor ASTER é uma boa ferramenta na discriminação de áreas prováveis para mineralização de níquel laterítico.

No modelamento, foram utilizados os modelos de integração de dados por meio dos métodos booleano e *fuzzy*. Ambos apresentaram bons resultados na avaliação de áreas com potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico na área estudada. Na análise booleana foi utilizado a sobreposição de mapas temáticos relacionados à geomorfologia e aerogeofísica e o resultado obtido foi um modelo rígido de sim ou não, ou seja, áreas aptas para ocorrência de depósitos de níquel laterítico e áreas inaptas. No entanto, com a lógica booleana foram geradas algumas dúvidas que puderam ser melhor avaliadas com a aplicação da lógica *Fuzzy*, mostrando que a definição das incertezas nos resultados é um fator importante nesse tipo de análise espacial. A lógica *Fuzzy* apresentou um aumento das áreas mapeadas onde ocorre o minério de níquel laterítico em Niquelândia.

Este estudo possibilitou verificar o potencial e a flexibilidade dos métodos *Fuzzy* e booleano em estudos de modelamento de depósitos minerais de níquel laterítico, podendo ser aplicados em áreas de difícil acesso, facilitando os mapeamentos tradicionais na avaliação de recursos minerais.

3.8. REFERÊNCIAS

ADAMS JB, SABOL DE, KAPOS V, ALMEIDA FILHO R, ROBERTS DAR, SMITH MO & GILLESPIE AR. 1995. Classification of multispectral images based on fraction of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Rem. Sens. Envir.*, New York, 52: 137-154.

AN P, MOON WM, & RENCZ AN. 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1): 1-11.

- BAPTISTA GMM & MENESES PR. 2009. Identificação de sesquióxidos de ferro da fração argila de solos tropicais por meio de decomposição espectral linear dos dados do sensor AVNIR-2 do sistema ALOS. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Anais.....Natal: INPE, 2009, 7655-7662.
- BLUM MLB. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. 1999. 229 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 1999.
- BOLDT, J.R. 1967. The winning of nickel, Longmans Canadá Ltd., Toronto. 487 p.
- BÖNISCH S.; LOPES ASSAD ML, MONTEIRO AMV & CÂMARA G. 2004. Representação e propagação de incertezas em dados de solo. II – Atributos numéricos (1) Rev. Bras. Cien. Solo, 28(1): 33-47.
- BONNET BRP, FERREIRA LG & LOBO FC. 2006. Uso de dados SRTM como suporte à implementação de um sistema de reserva legal extra-propriedade por bacia hidrográfica no Cerrado Brasileiro. Rev. Bras. Cartog., 58:129-137.
- BONHAM-CARTER G.F. 1994. Geographic Information System for geoscientists – Modeling with GIS. Pergamon Ontário, 400 p.
- BRITO NEVES BB, VAN SCHMUS WR, SANTOS EJ, CAMPOS NETO MC & KOZUCH M. 1995. O evento Carirís Velhos na província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas: Rev. Bras. Geoc., 25: 279–296.
- BRYANT RG. 1996. Validated linear mixture modeling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. Inter. Jour. Rem.Sens. 17(2): 315-330.
- BROOKS RR, REEVES RD, BAKER AJM. RIZZO JA & DIAZ FERREIRA, H. 1990. The Brazilian Serpentine Plant Expedition (BRASPEX), 1988. N. Geograp. Research., 6: 205-219.
- BURROUGH PA, MACMILLAN PA & VAN DEURSEN W. 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observation and topography. Jour. Soil Scie., Reading, 43(2): 193-210.
- BURROUGH PA & McDONNEL RA. 1998. Principles of geographic information systems. Oxford: Oxford University Press, 333 p.
- CÂMARA C, MOREIRA FR, BARBOSA FILHO CRA & BÖNISCH S. 2001. Técnicas de Inferência Geográfica. In: CÂMARA G, DAVIS C & MONTEIRO MVM. (Coords.), Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 241-288 p.
- CARRINO TA, SILVA AM, BOTELHO NF & CARDOSO DA SILVA AA. 2011. Análise prospectiva para ouro nas regiões Ouro Roxo-Cantagalo e Chico Torres, Província Mineral do Tapajós. Rev. Bras. Geof. 29(1): 135-154.

- CARRANZA EJM. 2009. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS – Handbook of exploration and Environmental Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, v.11, 347 p.
- CARVALHO JUNIOR AO, BAPTISTA GMM, MADEIRA NETTO JS, MARTINS ES, CARVALHO APF & MENESES PR. 1998. Utilização de Dados Hiperespectrais do Sensor AVIRIS para Identificação da Feição Espectral da Ligação Magnésio-Hidroxila em Lateritos Niquelíferos. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1998, Santos. Anais.....Santos: INPE, 1998, 1283-1294.
- CARVALHO APF, CARVALHO JÚNIOR OA, GUIMARÃES RF, MADEIRA NETO JS & BUSTAMANTE MMC. 2001. Measurement of color in hyperspectral images (AVIRIS) using the CIE (Commission Internationale D’clairage) system. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 10, California, Pasadena. JPL Airborne Earth Science Workshop, 10, California, Pasadena. Proceedings, JPL Publication, 2(1):133–140.
- CARVALHO JUNIOR OA, CARVALHO APF, MENESES PR, GUIMARÃES RF & MARTINS ES. 2003. Análise de Imagens Hiperespectrais pelo Método Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (Mesma) em Depósito Supergênico de Níquel Rev. Bras. Geoc. 33(1): 63-74.
- CARVALHO JUNIOR AO, MARTINS ES, CARVALHO APF, MENESES PR, GUIMARÃES RF & CARDOSO FBF. 2004. Estimativa da Abundância de Minerais do Depósito de Níquel Laterítico da Mina Fazenda por Espectrorradiometria. Rev. Bras. Geoc. 34(4): 579-586.
- CARVALHO JÚNIOR OA, GUIMARÃES RF, MARTINS ES, CARVALHO, APF & GOMES RAT. 2005. Análise Comparativa do Processo de Identificação Automatizada de Membros Finais a Partir de Imagens com Diferentes Resoluções Espectrais para a Região de Niquelândia (AVIRIS, ETM+ E ASTER) Rev. Bras. de Geof., 23(1):39-50.
- COLIN F, NAHON D, TRESCASES JJ & MELFI AJ. 1990. Lateritic weathering of pyroxenites at Niquelândia, Goiás, Brazil: the supergene behavior of nickel. Econ. Geol., 85: 1010-1023.
- CORREIA CT; GIRARDI VA, LAMBERT DD, KINNY PD & REEVES SJ. 1996. 2 Ga U-Pb (SHRIMP-II) and Re-Os ages for the Niquelândia Basic-Ultrabasic Layered Intrusion, Central Goiás, Brazil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. 1996. Salvador, BA. Anais....Salvador: SBG, 1996, 6: 187-189.
- CORREIA CT, GIRARDI VAV, TASSINARI CCG & JOST H. 1997. Rb-Sr And Sm-Nd Geochronology Of The Cana Brava Layered Mafic-Ultramafic Intrusion, Brazil, And Considerations Regarding Its Tectonic Evolution, Rev. Bras. Geoc. 27(2): 163-168.
- CORREIA CT, JOST H, TASSINARI CCG, GIRARDI VAV & KINNY PD. 1999. Ectasian Mesoproterozoic U-Pb Ages (Shrimp Ii) For The Metavulcanosedimentary Sequences Of Juscelândia And Indaianópolis And For High Grade Metamorphosed Rocks Of Barro Alto Stratiform Igneous Complex, Goiás State, Central Brazil, Actas... In: South American Symposium on Isotopic Geology, 2, 1999, Argentina. Actas....Cordoba, 1999, 31-33.

- COSTA JLG. 1970. Jazidas de níquel do maciço de São José do Tocantins-Notas sobre a geologia econômica e pesquisas pela Cia Níquel Tocantins. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 24, 1970. Brasília. Resumos....SBG, 1970, 140-143 p.
- CRÓSTA AP. 1992. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, SP. 1992. 173p.
- CRUZ JR, DE SOUZA FILHO CR, ABRAM MB & MARCON R. 2011. Caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá (MG). In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. Anais....Curitiba: INPE, 2011, 3530.
- CRÓSTA AP, SOUZA FILHO CR, AZEVEDO F & BRODIE C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *Inter. Jour. Rem. Sens.*, 24(21): 4233-4240.
- DANNI JCM, LEONARDOS OH, CASTRO JUNIOR ACM, MAGNAVITA LP, COSTA AP, LOBO RLM, VEIGA ATC, MOURA VR, ÁREA LIMA BM, - ARAUJO MC, VESSANI LA & PERES WE. 1977. Complexo de Tocantins- GO. Projeto Niquelandia. Trabalho de Graduação Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.
- DANNI JCM & LEONARDOS OH. 1978. As sequências granulítica, anortosítica-anfibolítica-ultramáfica da região de Niquelândia-GO. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30. 1978. Recife. *Resumos...*Recife, SBG, 1978, Bol. 1: 45.
- DANNI JCM & LEONARDOS OH. 1980. Granulite metamorphism and deformation in ancient composite layered intrusions: The Niquelândia Complex, Brazil. In: XXVI International Geological Congress. 1, Paris, Abstracts...Paris, 35.
- DANNI JCM, FUCHS RA & LEONARDOS OH. 1982. Archean and Lower Proterozoic Units in Central Brazil. *Geol Rundschau*. 71: 291-317.
- DIAS RR & PARADELLA WR. 1997. Integração de dados aéreos gamaespectrométricos com imagens TM-Landsat no mapeamento geológico da área do Pojuca, província mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geof.* 15(1): 23-33.
- DICKSON BL & SCOTT KM. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Jour. Aust. Geol. Geoph.*, Austrália, 17(2): 187-200.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2011. Disponível em: www.dnpm.gov.br. Acesso em: 2012.
- DUCART DF, CRÓSTA AP, SOUZA FILHO CR & CONIGLIO J. 2006. Characterizing surficial alteration at Los Menucos epithermal district, Patagonia, Argentina, using shortwave infrared spectrometry and ASTER multispectral images. *Economic Geology*, 101(5):981-996.
- EDDY BG, BONHAM-CARTER GF & JEFFERSON CW. 2010. Mineral potential analyzed and mapped at multiple scales—a modified fuzzy logic method using digital geology. Harris, J. R.

(editor), in *GIS Applications in Earth Sciences: Special Publication*. Geological Association of Canada, Special Publication 44:143–162.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. Inc., 380 New York Street, Redlands, CA 92373 USA.

ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). Aster product guide. 2006. Disponível em: www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/release_e/set_release_ehrs.html. Acesso em 2 março de 2010.

FERREIRA FILHO CF & NALDRETT AJ. 1993. The Niquelândia mafic-ultramafic complex revisited: tectonic setting and potential for PGE deposits. In: Brazilian PGE Meeting, 1, Brasília, 1993, Extended Abstract....Brasília: SBG, 1993, 25-28.

FERREIRA FILHO CF & PIMENTEL MM. 1999. Sm-Nd Isotop Systematic and Ree-Hf- Ta-Th Data for Mafic Rocks of The Niquelândia Complex Upper Layered Series, Central Brazil: Further Constraints for the Timing of Magmatism and High Grade Metamorphism. In: II South American Symposium Isotope Geology, Cordoba, Argentina, 1999. Actas.....1: 60-62

FERREIRA FILHO CF, NILSON AA & NALDRETT AJ. 1992. The Niquelândia Mafic-Ultramafic Complex, Goiás, Brazil: a contribution to the ophiolite X stratiform controversy based on new geological and structural data. *Precamb. Resea.*, 59:125-143.

FERREIRA FILHO CF, KAMO S, FUCHS RA, KROGH TE & NALDRETT AJ. 1994. Zircon and rutile geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic intrusion, Brazil: constraints for the timing of magmatism and high grade metamorphism. *Precamb. Res.*, 68: 241-255.

FERREIRA FILHO CF, MORAES RD, FAWCETT JJ & NALDRETT AJ. 1998. Amphibolite To Granulite Progressive Metamorphism In The Niquelândia Complex, Central Brazil: Regional Tectonic Implication. *Jour. S. Amer. Earth Sc.* 11(1): 35-50.

FUCHS RA, DANTAS EL, PIMENTEL MM, LAUX JH, JUNGES S; OLIVEIRA CG, DE SORDIDA & CHIARINI MFN. 2006. Sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil: Novos Dados Geológicos, Idades U-Pb em Zircão e Dados Isotópicos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 43, 2006, Aracaju. Anais... Aracaju: SBG. 2006, 1: 129-129.

GARNIER J, QUANTIN C, GUIMARÃES E., GARG VK, MARTINS ES & BECQUE T. 2009. Understanding the genesis of ultramafic soils and catena dynamics in Niquelândia, Brazil. *Geoderma*, 151, (3-4): 204-214.

GEOSOFT. 2009. OASIS Montaj 7.1. Geosoft, inc., Toronto.

GIRARDI VAV, RIVALENTI G & SINIGOI S. 1986. The petrogenesis of the Niquelândia Layered Basic-Ultrabasic Complex, Central Goiás, Brazil. *Jour. Petrol.*, 27(3): 715-744.

HUNT GR, SALISBURY JW & LENHOFF CJ. 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Oxides and hydroxides. *Mod. Geol.*, 3: 195-205.

- HUTCHINSON MF. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia, 106: 211-232.
- HUTCHINSON MF. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Jour. Hydrol.*, 106: 211–232.
- KECKLER D. 1994. *Surfer® for Windows. User's Guide*. Golden Software, Inc.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A. 2006. Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – Paleo-Neoproterozóico Do Nordeste De Goiás-Convênio SGM / /MME / CPRM - SIC / SGM / FUNMINERAL. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Volume I –Texto Técnico.
- LOMBARD J. 1956. Sur la géochimie et les gisements du nickel. *Chronique des mines d’Outre-Mer-Paris*. n. 244, 20 p.
- MADRUCCI V, VENEZIANI P & PARADELLA WR. 2003. Caracterização geológica e estrutural através da interpretação do produto integrado TM-Landsat 5 e dados aerogamaespectrométricos, região de Alta Floresta - MT. *Rev. Bras. Geof.*, 21(3): 219-234.
- MANTOVANI MSM & BRITO NEVES BB. 2005. The Paranapanema Lithospheric Block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) Supercontinent theories. *Gondwana Res.*, 8(3): 303-315.
- MEDEIROS, ES & FERREIRA FILHO CF. 2001. Caracterização Geológica e Estratigráfica das Mineralizações de Platina e Paládio Associadas à Zona Máfica Superior do Complexo de Niquelândia, GO. *Rev Bras Geoc.*, 31(1): 29-36.
- MELFI AJ, TRESCASES JJ & OLIVEIRA SMB. 1980. Les “laterites” nickelíferes du Brésil. *Cah Orstom, Sér. Geol.*, 11: 15-42.
- MENESES PR, PONTARA RCP, FREITAS SILVA F & MADEIRA NETO JC. 2001. Comportamento da Reflectância Espectral de Filitos Carbonosos Mineralizados em Ouro. *Rev. Bras. Geoc.* 31(1): 83-88.
- MENESES PR & ALMEIDA T. 2012. Aritmética de Bandas. In: Meneses PR & Almeida T (coord.). *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. UnB e CNPQ, Brasília. 264 p, 138-152 p.
- MIETHKE C, SOUZA FILHO CR & SILVA AM. 2007. Assinatura geofísica e modelos prospectivos ‘knowledge-driven’ de mineralizações de Au no lineamento Congonhas, sul do Cráton São Francisco, MG. *Rev. Bras. Geoc.* 37(3): 490-503.
- MOREIRA SILVA FR. 2001. *Uso e Avaliação de Técnicas de Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral Aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas*. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 160 p.

- MOTTA J, LINDENMAYER D & SILVEIRA NC. 1970. Geologia do Maciço São José do Tocantins. In: Congresso Brasileiro de Geologia 24; Roteiro Excursão, Bol. Esp, 2: 32-37.
- MOTTA J, ARAÚJO V, MELLO JCR & OGUINO K. 1972. Projeto Niquelândia. Relatório Final. Goiânia, DNPM/CPRM. 1: 224.
- NABIGHIAN MN. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507-517.
- NABIGHIAN MN. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1): 85-92.
- NYKÄNEN V, GROVES DI, OJALA VJ, EILU P GARDOLL SJ. 2008. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper - Gold deposits in the northern Fennoscandian shield, Finland. *Australian Journal of Earth Sciences*. 55(1): 25-38.
- OLIVEIRA SMB, TRESCASES JJ & MELFI AJ. 1992. Lateritic Nickel Deposits of Brazil. *Mineral. Depos.* 27(2): 137-146.
- PECORA WT & BARBOSA ALM. 1944. Jazidas de Níquel e de Cobalto de São José de Tocantins, Estado de Goiás. Dnpm/Dfpm, Boletim 64p.
- PEDROSO A.C & SCHMALTZ WH. 1981. Jazimentos de níquel laterítico de Niquelândia-Goiás. In: SCHMARTZ, W.H. (coord.). Os Principais depósitos minerais da região Centro-Oeste. DNPM, Goiânia. 252 p, 184-207 p.
- PEDROSO AC & SCHMALTZ WH. 1986. Jazimentos de níquel laterítico de Niquelândia-Goiás. In: Schobbenhaus, C & Coelho, C. E. S. (coord.). Os Principais depósitos minerais do Brasil. Vol II. DNPM, Brasília. 501p, 307-314 p.
- PIMENTEL MM, FERREIRA FILHO CF & ARMSTRONG RA. 2004. Shrimp U-Pb And Sm-Nd Ages Of The Niquelândia Layered Complex: Meso- (1.25 Ga) And Neoproterozoic (0.79 Ga) Extensional Events In Central Brazil, *Prec. Res.* 132: 133-153.
- PIMENTEL MM & FUCK RA. 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*. 20: 375-379.
- PIMENTEL MM, FUCK RA, JOST H, FERREIRA FILHO CF & ARAÚJO SM. 2000. The basement of the Brasília fold belt and the Goiás magmatic arc. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, DNPM, 195-229.
- PIMENTEL MM, HEAMAN L, FUCK RA & MARINI OJ. 1991. U-Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-tupe acid magmatism in central Brazil. *Precamb. Resea.*, 52: 321-335.

- PIRES ACB & MORAES RAV. 2006. New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation. In: 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, 2006, Ouro Preto, MG.
- RAINES GL & BONHAM-CARTER .F. 2006, Exploratory spatial modelling: demonstration for Carlin-type deposits, central Nevada, USA, using Arc-SDM. In: Harris J.R. (Ed.) GIS for the Earth Sciences. Geological Association of Canada. Special Publication 44, 23-52.
- RIBEIRO JF & WALTER BMT. 1998. Fitofisionomias do bioma cerrado. *In* Cerrado: ambiente e flora (S.M. Sano & S.P. Almeida, eds). EMBRAPA-CPAC, Planaltina, 89-166 p.
- RIVALENTI G, GIRARDI VAV, SINIGOLFI S, ROSSI A & SIENA F. 1982. The Niquelândia mafic-ultramafic complex of Central Brazil: petrological considerations. *Rev. Bras. Geoc.*, 12: 380-39.
- ROBB LJ. 2004. Introduction to ore-forming processes. Blackweel publishing, 368 p.
- ROEST WR, VERHOEF J & PILKINGTON M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1): 116-125.
- ROWAN LC & MARS JC. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emissivity and Reflection Radiometer ASTER data. *Rem. Sens. Environ.*, 84(3): 350-366.
- SANTOS PS. 1989. “Classificação, Nomenclatura e Identificação dos Argilominerais”, In: Edgard Blücher, *Ciência e Tecnologia de Argilas*, 2 ed, cap. 4, vol.I, São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda.
- SHERMAN DM & WAITE TD. 1985. Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hidroxides in the near IR to near UV. *Am. Mineral*, 70: 1262-1269.
- SILVA, AB. 2003. *Sistemas de Informações Geo-Referenciadas: Conceitos e Fundamentos*. Campinas, SP, Editora da Unicamp, 236 p.
- SILVA JX. 2001. *Geoprocessamento para análise ambiental*. Rio de Janeiro: D5 Produção Gráfica, 228 p.
- SHIMABUKURO YE & SMITH, JA. 1991. The least-squares mixing models to generate fractio images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transac. Geosc. Rem. Sens.*, 29(1): 16-20.
- SCHUMACHER D. 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, *In*: Schumacher D. & Abrams M.A. (eds.) *Hydrocarbon Migration and its Near Surface Expression*. AAPG Memoir 66: 71-89.
- SOUZA JO & LEÃO NETO R. 1998. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto Borda Oeste dos Maciços Básico-Ultrabásicos de Niquelândia e Barro Alto. Estado de Goiás, 1:100.000, Brasília: CPRM, 56p.

- TRESCASES JJ. 1975. L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickelifères de Nouvelle-Calédonie. Nancy, 1975. 259p. (Men. ORSTOM, 78).
- TRESCASES JJ, MELFI AJ & OLIVEIRA SMB. 1981. Nickeliferous laterites of Brazil. In: International Seminar on Lateritisation Processes. Trivandrum, Índia, Proceeding, 170-184.
- TSOUKALAS LH & UHRIG RE 1997. Fuzzy and neural approaches in engineering. (Ed) New Yorkm John Wiley and Sons, Inc., 587p.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/>. Acesso em: 02 fev. 2010.
- WILFORD JR, BIERWIRTH PN & CRAIG MA. 1997. Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. AGSO. J. Aus. Geol. Geoph., 17: 201-216.
- ZIMMERMANN HJ & ZYSNO P. 1980. Latent connectives in human decision making. *Fuzzy Sets and Systems* 4: 37-51.

CONCLUSÕES FINAIS

A utilização dos dados aerogeofísicos se mostrou muito eficiente no modelamento do potencial de distribuição do depósito de níquel laterítico de Niquelândia. A metodologia aplicada aos dados aerogeofísicos, teve como base as técnicas presentes na literatura, bem como procedimentos adicionais desenvolvidos nesse trabalho, que melhoraram a qualidade das respostas dos produtos finais obtidos. A combinação dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos utilizando modelos matemáticos resultaram na geração do Índice Máfico (IM). O IM mostrou-se eficiente na delimitação das áreas com ocorrência de rochas máfica-ultramáficas do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, que apresentam maior influência magnética, em relação às unidades geológicas adjacentes. O IM também foi importante na delimitação em superfície de áreas enriquecidas em minerais portadores de Fe^{3+} presentes no depósito de níquel laterítico avaliado. Assim, a combinação de dados gamaespectrométricos e magnetométricos deve ser melhor explorada para composições litológicas diferentes utilizando as variações matemáticas dos elementos do eU, eTh, K e ASA.

Os resultados obtidos de sensoriamento remoto, por meio de processamento digital da imagem do sensor Aster, com aplicação de razão de bandas Fe^{3+}/Fe^{2+} e o Modelo Linear de Mistura Espectral, aplicando a biblioteca espectral criada das amostras dos minérios oxidado, silicatado e horizonte A do solo, apresentaram um bom desempenho na discriminação de áreas ricas em óxidos e oxihidróxidos enriquecidos em ferro (hematita e goethita), bem como no minério silicatado, particularmente a pimelita, que foi identificado em áreas já em processo de lavra, com exposição deste que ocorre sotoposto ao minério oxidado ao longo do perfil de alteração pedogenética.

A análise geomorfológica da área de estudo mostrou ser uma importante ferramenta para a compreensão da sequência evolutiva da paisagem nos processos pedogenéticos. Os produtos obtidos pela geomorfologia, tais como altimetria, declividade e curvatura facilitaram a interpretação dos resultados extraídos da aerogeofísica em áreas com influência do material de origem ou processos pedogenéticos, tendo em vista que, a sequência evolutiva da paisagem é um aspecto essencial na interpretação dos processos de formação do depósito de níquel laterítico. Desta forma, a paisagem geomorfológica e sua evolução influenciam diretamente nas respostas de produtos extraídos da aerogeofísica, sensoriamento remoto para o mapeamento e a definição de modelos de distribuição de depósitos minerais.

O resultado dos mapas de favorabilidade de níquel laterítico utilizando os métodos booleano e *fuzzy* com emprego de variáveis de geofísica, litologia e relevo mostraram uma alternativa a ser utilizada como indicativo de áreas com potenciais em depósitos minerais. A metodologia desenvolvida neste trabalho apresentou-se apropriada para o estudo do depósito de níquel laterítico de Niquelândia, GO.

RECOMENDAÇÕES

Algumas recomendações que poderão ser utilizada para melhorar trabalhos futuros nesta e áreas afins.

Melhorar os mapas de solo e geológico, do estado de Goiás, para uma escala mais compatível com os dados aerogeofísicos. Recomenda-se trabalho de campo para coleta e caracterização dos solos existentes na área de interesse.

A utilização de aerogeofísica no mapeamento digital de solos e mineralização pedogenética.

Utilização do Índice Máfico para mapeamento/individualização de rochas ultramáficas em outras áreas tais como os Complexos de Barro Alto e Cana Brava.

A utilização de espectroradiometria com a obtenção de assinatura espectral para caracterização de solos e mineralizações pedogenéticas se mostrou promissora.

Extrapolar o modelo gerado para áreas afins.

Spectral behaviour of the nickel ore in Niquelândia deposit, Goiás, Brazil, using

ASTER Satellite Sensor Imaging

Barbosa, Inara Oliveira^(a); Pires, Augusto Cesar Bittencourt^(b);

Lacerda, Marilusa Pinto Coelho^(c); Carmelo, Adriana Chatack^(b).

^a Departamento Nacional de Produção Mineral, Edifício Sede. S.A.N. Quadra 1 Bloco B sala 105B Asa Norte 70041-903 - Brasília, DF – Brasil inara.barbosa@dnpm.gov.br.

^b Universidade de Brasília, Instituto de Geociências-IG, Departamento de Geoquímica e Recursos Minerais. Campus Universitário Darcy Ribeiro Asa Norte 70910-900 - Brasília, DF – Brasil. acbpires@unb.br, chatack@unb.br.

^c Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. UnB Campus Universitário Darcy Ribeiro - Instituto Central de Ciências - Asa Norte 70910-900 - Brasília, DF - Brasil marilusa@unb.br.

Abstract

The nickel deposits in Niquelândia, state of Goiás, Brazil, are formed from pedogenic processes, with the formation of lateritic deposits developed over mafic- ultramafic complexes from the alterations of the ultramafic zone comprised of: pyroxenites and peridotites/dunites. The main minerals that make up the weathering profile of lateritic nickel deposits are: pimelite, saponite, goethite, hematite, kaolinite. The aim of this study is to compare methodologies for quantification of minerals, particularly hematite and goethite with the use of ASTER imaging in the lateritic nickel deposit at Niquelândia -GO, in order to assess relative abundance of oxidized and silicate minerals that are important in the description of the weathering profile of the deposit. We used the ASTER Satellite Sensor Imaging which ratios bands for individualization of areas enriched in Fe³⁺ and spectral curves of the oxidized ores, silicate and soil horizon in this prospect area of lateritic nickel obtained through spectroradiometer using the Linear Spectral Unmixing Model (LSUM). The two techniques applied showed very similar responses with the use of spectral curves with the more shallow soil collected in the area for prospecting nickel. The band ratio Fe³⁺/ Fe²⁺, even though a simpler technique than the LSUM, proved very effective in coverage analysis enriched in iron oxides (hematite and goethite) in the study area in Niquelândia.

Keywords – remote sensing, pimelite, soil, linear spectral unmixing model

1. Introduction

Research on the supergene nickel deposits in Brazil, developed from several types of ultramafic rocks in different climatic conditions, allows the evaluation of the role of petrographic and morphoclimatic factors in the genesis of lateritic nickel ore (Oliveira et al., 1992). The

conditions for the formation of nickel deposits are presented by two types: sulfide deposits from hypogenic origins and lateritic deposits from supergene origins (Lombard, 1956; Boldt, 1967).

The lateritic nickel ore are surficial rinds formed by intensive tropical weathering on ultramafic rocks in tropical areas. Among the factors that influence their formation, such as lithology and structural factors. The ones that stand out are: the ultramafic rocks, tropical zonal contrast and secondary terrain with rejuvenation after a tectonic elevation (Trescases et al., 1992). The main identified minerals that make up the weathering profile of lateritic nickel deposit are: pimelite, saponite, goethite, hematite, kaolinite (Carvalho Junior et al., 2003). Pimelite and saponite belong to the generic term, garnierite, which is used to define a mixture of nickel and magnesium hydrosilicates.

The adequacy of methods that use radiometry in the visible and infrared ranges, to estimate the abundance of the mineral in the laterite profile, have the advantage in speed of information acquisition (Carvalho Junior et al., 2003). The mineralogy weathering profile of the Niquelândia nickel deposit, in a simplified form, can be stacked at the base by pimelite and goethite, and as one moves towards the surface, there is an increased amount of hematite, kaolinite and chalcedony rich iron at the top (and Schumaltz Pedroso, 1981; Oliveira et al., 1992; Junior Carvalho et al., 2003).

The aim of this study is to compare methodologies for quantification of minerals, particularly hematite and goethite through spectral data processing and ASTER band-ratio imaging of the lateritic nickel deposit in Niquelândia - GO, in order to assess relative abundance of oxidized minerals that are important for describing the weathering profile and the formation of nickel ore.

2. Methods

The study area is located in the state of Goiás, in the municipality of Niquelândia, geologically inserted in the Mafic - Ultramafic Complex of Niquelândia. Access is from Brasília, by taking highway BR -080 to the town of Padre Bernardo. From Padre Bernardo follow the BR-080 to BR-414 and from there continue to Niquelândia (Figure 1).

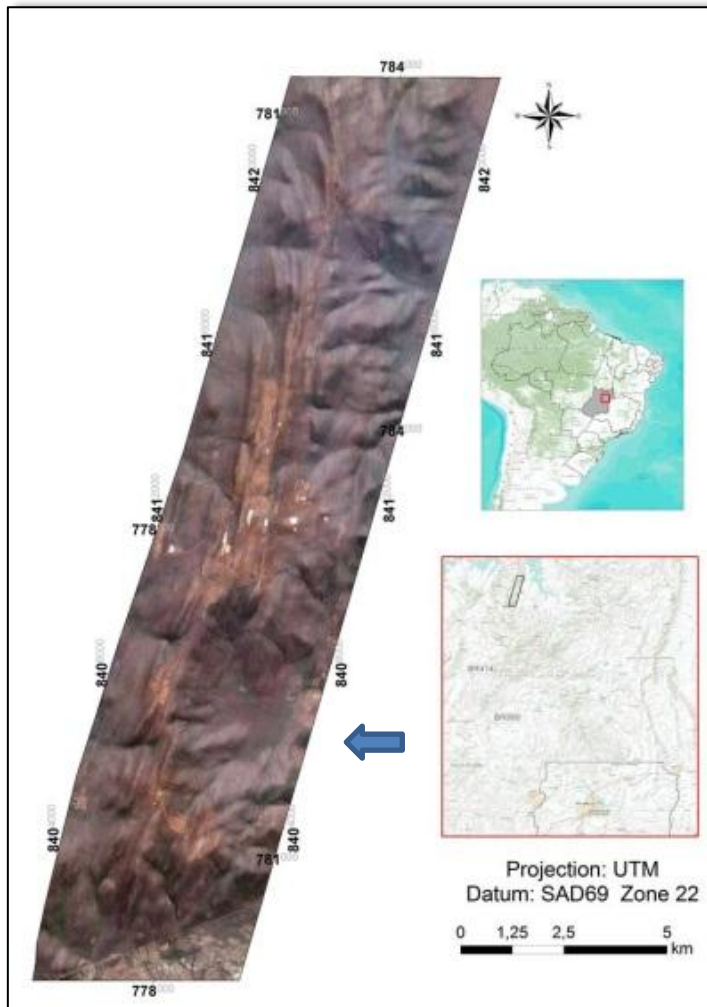


Figure 1 - Location map of study area.

2.1 Processing of ASTER Sensor Imaging

The use of spectral analysis techniques allow a good estimate for the identification of targets of interest in remote sensing products. In this work we used a L1B scene taken on 08/21/2001 by ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) aboard the Terra satellite. The ASTER is a joint project between Japan and the United States. The ASTER consists of three subsystems: (a) visible and near infrared (VNIR) with 3-band spectrum resolution of 15 meters, (b) shortwave infrared (SWIR) with 6 spectrum bands with spatial resolution of 30 meters and (c) thermal Infrared (TIR), 5 thermal bands with spatial resolution of 90 meters (Figure 2).

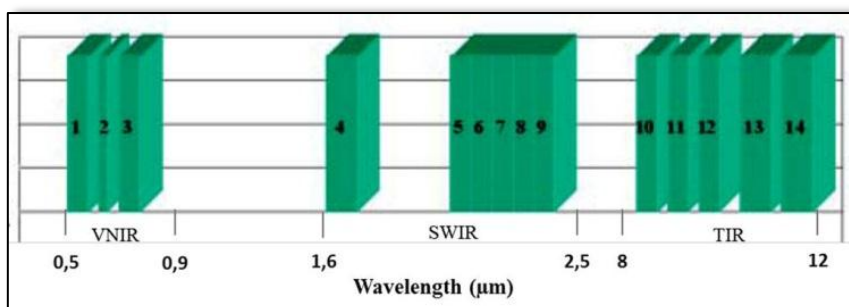


Figure 2 - Range of spectral bands of ASTER images.

The process was developed in four stages: a) pre-processing of digital images of the ASTER b) acquisition of spectral curves of samples of soils and rocks collected in the field through readings with a spectroradiometer in the laboratory; c) digital processing of ASTER images for individualization of the areas enriched in Ni and d) analysis and interpretation of the products generated (figure3). The digital pre - processing of the ASTER image comprised of the following steps: correction of the cross-talk effect through the program CRSTK30 (ERSDAC 2006), resampling of the SWIR bands and merge with the VNIR bands and atmospheric correction.

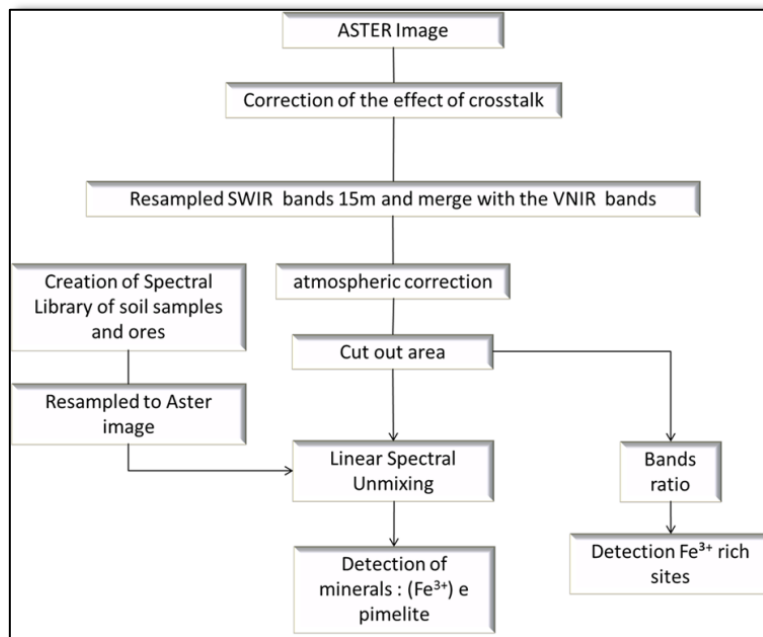


Figure 3 - Flowchart of the procedures performed on the ASTER image.

The ASTER images were corrected for the effect of cross-talk, which operates in the SWIR bands and is caused by the scattering of electromagnetic incident radiation EMR on the band 4 detectors of the sensor (ERSDAC , 2003). The bands in the shortwave infrared - SWIR (bands 4, 5, 6, 7, 8 and 9) from ASTER were resampled to fifteen feet, maintaining the same spatial resolution of bands in the visible and near- infrared VNIR (bands 1, 2 and 3). The atmospheric correction was performed using the program FLAASH (Fast Line- of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) program ENVI 4.8, based on the use of MODTRAN 4 (Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model), which transforms radiance values for a surface reflectance . The atmospheric correction is needed to remove the effects due to changes in satellite-sun geometry and atmospheric conditions. Later, we cut out the image according to the study area.

2.2 Band Ratio

In digital image processing ASTER 2001, we used the VNIR and SWIR bands for highlighting areas rich in Fe³⁺ (hematite). This technique was used because of the mineralogical weathering profile the nickel deposit presented at the surface, mineral-rich in Fe³⁺ as with hematite. Initially the ratio between B2/B1 was performed in order to identify materials rich in Fe³⁺ (hematite,

goethite), considering the absorption feature in band 1 and higher reflection in band 2 for Fe^{3+} . We then carried out the sum and the ratio of the bands (B5/B3) + (B1/B2), so as to highlight areas rich in Fe^{2+} (Rowan & Mars 2003). Finally we carried out the ratio between the $\text{RFe}^{3+}/\text{RFe}^{2+}$ products, in order to highlight areas rich in Fe^{3+} (Robb, 2004) and eliminate the area rich in Fe^{2+} .

2.3 Spectral Mapping

To individualize areas enriched in Ni we created a spectral library of minerals samples of silicate, oxidized and A-horizon soil, present in this nickel laterite prospecto of Niquelândia. For reading the spectral curves we used the portable spectroradiometer FieldSpec ® Hi- Res 3 (350-2500 nm)/A100590, able to perform spectral measurements of various materials (rocks , soil, plant and water) (Figure 4a). As a reference standard we used a barium sulfate plate which has high diffuse reflectance, it behaves as a Lambertian surface being used for estimating irradiance. We used the software RS2 to convert radiance measurements. As the curves created by the spectroradiometer they were resampled to the spectral resolution of the ASTER sensor through the program ENVI ® 4.8 (Figure 4b).

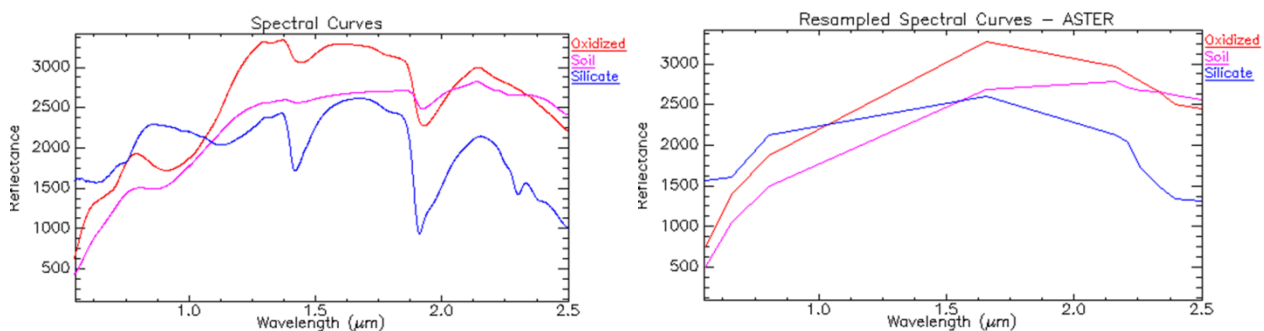


Figure 4 - Spectral curves of the samples of oxidized ore (red), soil (magenta) and silicate ore (blue). Curves of the samples taken from the spectroradiometer (a) and curves resampled to spectral resolution ASTER image (b).

With the spectral library created, we used the Linear Spectral Unmixing Model (LSUM) (Shimabukuro and Smith 1991), for mapping the minerals present in the samples. The LSUM is a technique, in principle, more accurate than the band ratio in the process of mineral identification from the respective spectral signatures of the samples. The LSUM tends to separate the materials in the composition of the pixel by the decomposition of the corresponding linear spectral reflectance and proposes to precisely determine the relative abundance of material in the subpixel range (Shimabukuro and Smith 1991). The result of the LSUM is the individualization per band for each material analyzed and the mean square error of the decomposition. The LSUM technique was applied to the spectral curves of the oxidized ores, silicate and soil and with the bands generated we performed RGB color composite - oxidized, silicate and soils.

To assist in the interpretation of these curves, analysis were carried out using the X-ray-diffraction (XRD) in order to obtain the mineralogical composition of mineral samples of silicate

and oxidized and soil of the mineralized area . For XRD we used the diffractometer Rigaku equipment, Ultima IV model from the Laboratory of X-ray diffraction of the Geosciences Institute at the University of Brasilia (IG-UnB), which has a goniometer and an in-line filter, both controlled by computer.

3. Results and Discussion

Remote sensing has the ability to identify and distinguish the compositions of different surface materials, whether vegetation types, land use patterns, and other rocks (Crósta, 1992). Several techniques can be used in spectral curves using hyperspectral and multispectral images.

3.1 Band Ratio

The basic principle of the band ratio is to suppress the spectral information common to both and enhance the difference. The band ratio allows the discrimination of different surfaces based on the analysis of the spectral curve characteristics, established by the positioning of gradients of reflectance or emissivity of the target or targets used along the considered range of the electromagnetic spectrum.

In digital image processing, ASTER 2001 band ratios for $R_{Fe^{3+}}/R_{Fe^{2+}}$ stressed areas rich in hematite and a possible correlation with mineral occurrences of Ni based on weathering profile in the form of nickel deposit (Figure 5). The band ratio has eliminated surfaces enriched in ferrous ions (Fe^{2+}) such as the minerals magnetite and maghemite and enhance areas rich in minerals containing ferric ions (Fe^{3+}) such as the minerals hematite and goethite (Schumacher, 1996). The mineralogy of the weathering profile of the Niquelândia nickel deposit is formed, from the base toward the top, by: pimelite, goethite, hematite, kaolinite and chalcedony rich in iron (Pedroso and Schumaltz, 1981, Oliveira, et al., 1992; Junior Carvalho et al., 2003).

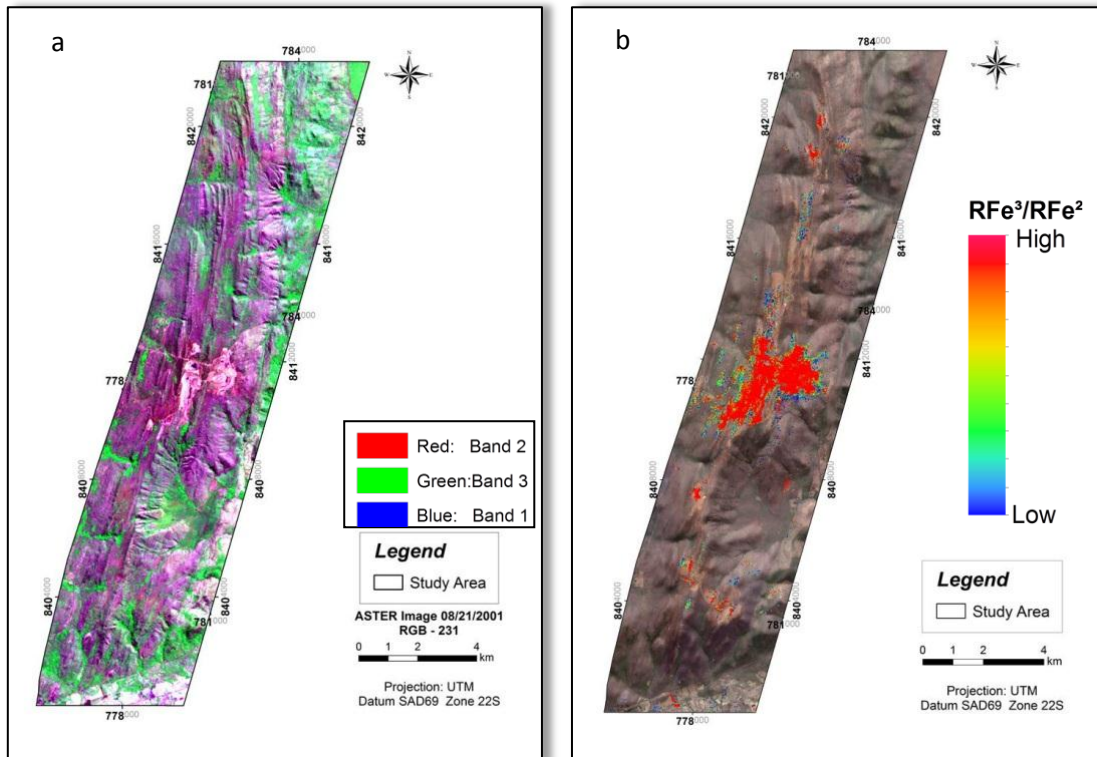


Figure 5 - Image from ASTER 2001 with RGB-231 composition (a). Image of Bing Maps with overlapping bands due to RFe^{3+}/RFe^{2+} (red) (b).

For comparison, we performed an RGB - 231 color composite from the ASTER 2001 image (Figure 5a) to show areas where exploitation of lateritic nickel was occurring. Then it was overlaid with the result from the band ratio RFe^{3+}/RFe^{2+} in a more recent image (Bing Maps) to verify compliance with the data (Figure 5b).

With the data obtained with the band ratio RFe^{3+}/RFe^{2+} and superimposed over the Bing Maps image (Figure 5b) we can see that the spectral response corresponds to the areas of mineral exploration as well as an indication of possible areas with potential for extraction of nickel ore based on the altered surface profile of deposits of nickel which appear rich in Fe^{3+} .

Despite the band ratio technique being a simpler process than that conducted, it showed to be efficient in the discrimination of surface materials rich in Fe^{3+} (red) in the study area.

3.2 Mapping Using Spectral Curve

With the spectral signatures extracted from samples of oxidized ores, silicate and the A-horizon of the soil along profile changes (Figure 6) in an area of mineral exploration in Niquelândia it was possible to perform processing for individualization from the ASTER image by means of Linear Spectral Unmixing Model (LSUM).

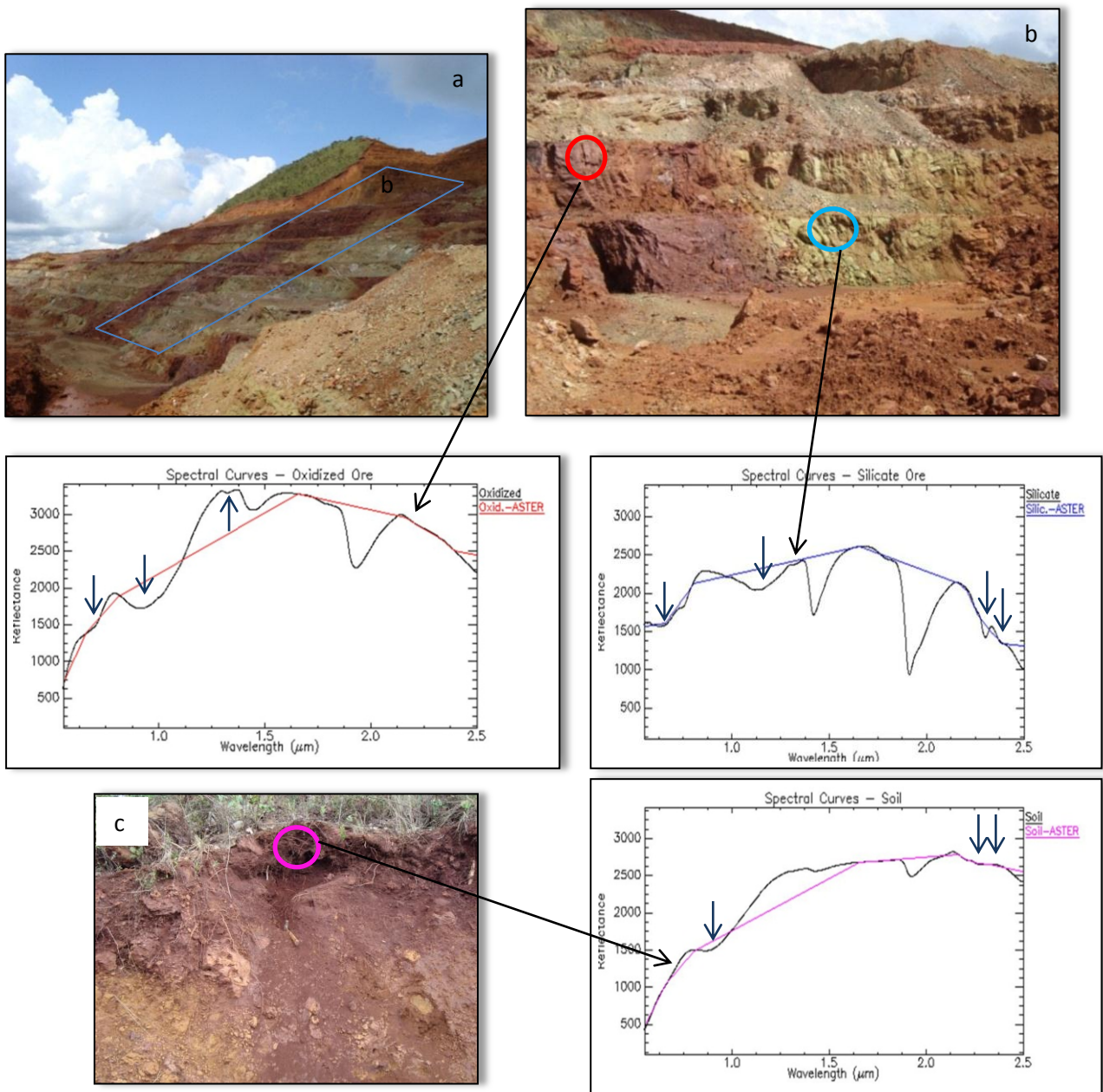


Figure 6 - Profile of change in the lateritic nickel deposit of Niquelândia (a). Detailed profile changes with indication of the samples and their spectral curves of the oxidized ores, silicate and A-horizon soil resampled to ASTER image spectral resolution (b). Soil profile and its spectral curve of sample A horizon (c).

The profile of change may be observed in more detail (Figure 6b) with individual levels of the oxidized minerals and silicate of the nickel deposit in Niquelândia.

The spectral curve of the oxidized ore showed absorption features of 0,43 μm , 0,48 μm , 0,67 μm and 0,90 μm . The spectral features of the soil showed absorption at 0,51 μm , 0,92 μm and 2,2 μm and 2,26 μm . Sherman & Waite (1985) described the spectral features of hematite from electronic crystal-field transitions of 0,55 μm , 0,65 μm and 0,885 μm , which differ in intensity in goethite which has features of 0,48 μm , 0,65 μm and 0,917 μm . The most general form of the spectra in this wavelength range is the sudden drop in reflectance from the beginning of near

infrared into the visible, widely known as a spectral feature of the rocks iron oxidized by weathering processes (Meneses et al., 2001). Thus, the oxidized ore has spectral features characteristic of goethite.

The spectral curves of soil samples and oxidized ore, when resampled to ASTER image showed very similar spectral features in the VNIR and SWIR region at 0,65 μm , 2,16 μm and 2,39 μm . The soil also showed spectral features in the SWIR region at 2,26 μm and 2,33 μm . The presence of the absorption feature 2.2 μm may be related to the presence of kaolin and / or montmorillonite. Kaolinite is identified by a double-absorbing feature of the connection from Al-OH in 2.2 μm (Hunt et al. 1971).

The presence of spectral signatures of 0.51 μm and 0.92 μm and 2.26 μm was an indication to infer that the soil composition presented minerals rich in Fe^{3+} and clay minerals (kaolinite). For identification of the samples of mineral oxidized ore and soil we performed an X-ray analysis. The results showed the presence of hematite, goethite and magnetite in oxidized ore and that the soil had been constituted by hematite, goethite and kaolinite. Highly weathered soils are presented consisting of: iron oxides and hydroxides (hematite and goethite) and aluminum (gibbsite) and kaolinite

According to Carvalho Junior et al. (2003) the silicate mineral pimelite presents a greenish coloration toward the top of the sequence Fe- saponite mineral and iron oxides originate a brownish color. The transition from oxidized to silicate facies occurs in a range of a few meters.

The Niquelândia mineral silicate analysis shows the absorption spectrum of 0,443 μm , 0,613 μm , 1,115 μm , 2,30 μm and 2,38 μm , in addition to absorption bands caused by the presence of water in the mineral structure and 1,40 to 1,90 μm as observed by Carvalho Júnior et al. (1998). One can verify the presence of the absorption band lying between 2,30 μm and 2,38 μm , the region of the spectrum that corresponds to the connection of Mg-OH. The presence of Mg-OH bond present in garnieritas nickelophilous (pimelite) occurs in approximately 2,30 μm (Carvalho et al., 1998).

The pimelite is a 2:1 clay mineral from the smectite group (Santos, 1989). The range of spectral absorption feature of Mg -OH features between 2,30 to 2,36 μm (Cruz et al., 2011) . The silicate ore when resampled to ASTER image showed spectral features similar to the soil and oxidized ore distinguishing spectral feature in 2.38 μm . Thus, the presence of iron oxides on the surface due to formation of the ore genesis causes the silicate mineral to be covered by Fe^{3+} in the region of VNIR (Carvalho Jr. et al., 1998).

The LSUM technique individualized oxidized and silicate minerals and soil. With the results we carried out RGB composition (R- oxidized G- silicate and soil - B) (figure 7). We was also made the spectral analysis of each band individually , with overlap in most recent image (Bing Maps) to

check the effectiveness of this technique (Figure 7b and 8a) . The LSUM has been successfully applied to map mineralogical (Adams et al., 1995, Bryant, 1996). Baptita & Meneses (2009) obtained good results using the LSUM in the identification and spectral decomposition of the two main linear sesquioxides of iron in the clay fraction of the tropical soils: haematite and goethite.

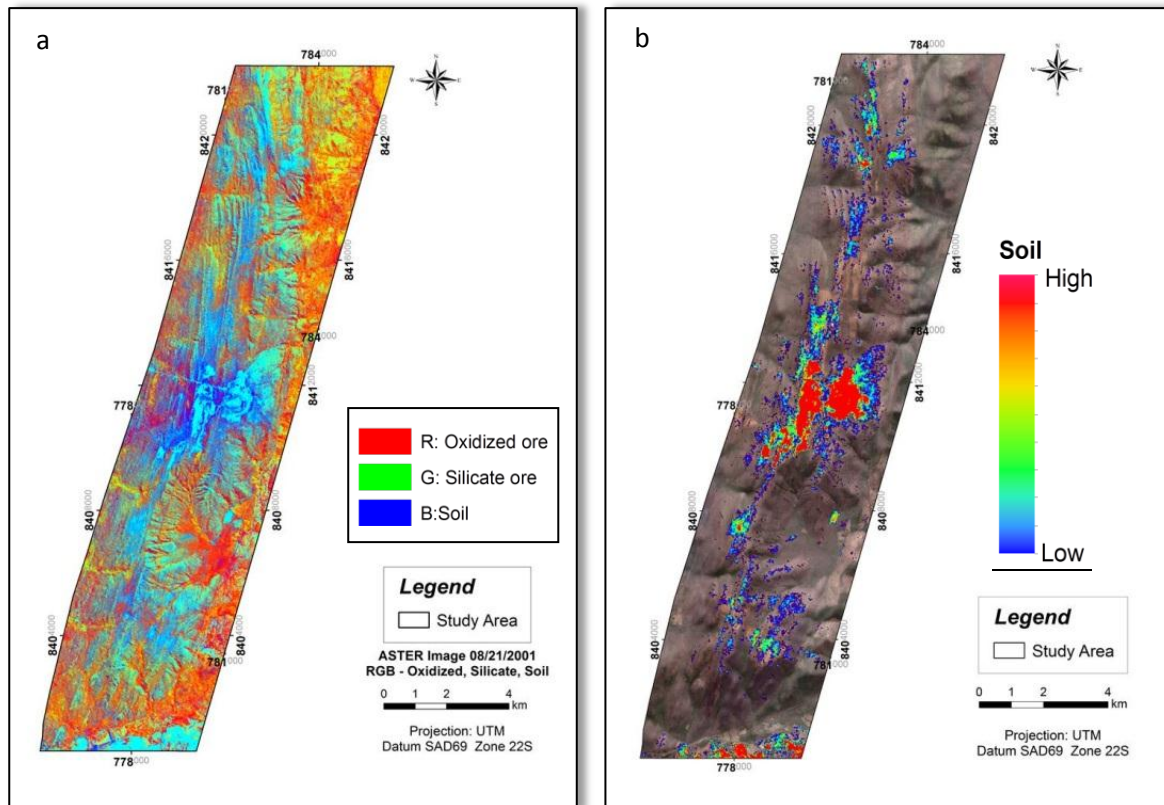


Figure 7 - Composition RGB - oxidized, silicate and soils (a). Image Bing Maps with overlap of the band of soil extracted from the LSUM (b).

The colored composition RGB – oxidized, silicate and soils (Figure 7a) shows the predominance in cyan and blue, indicating in the blue area a greater spectral response of the soil and in cyan a spectral mixture between soil and mineral silicate. The Bing Maps image overlapping the band of the soil extracted from the LSUM (Figure 7b) underlined the area at higher mineral exploration.

Analyzing the spectral bands separately obtained by the LSUM can verify that the soil sample had a response on the other predominant spectral reflectance curves of the ores. The spectral curve of the oxidized ore when used along with that of the soil masked the spectral response. This was verified when the data analysis was performed, separately, using a combination of spectral curves: oxidized minerals and silicate, oxidized ore and soil and silicate ore and soil. The combination of the spectral response of the soil and oxidized ore were very similar. Since the spectral features are very similar with only one variation in the spectral feature at 2,2 μm present in the spectral curve of the soil, probably derived from the bond Al-OH. As to the identification of

silicate ore, it showed some instances in the mining area as shown in the overlapping band extracted by the LSUM under the Bing maps image.

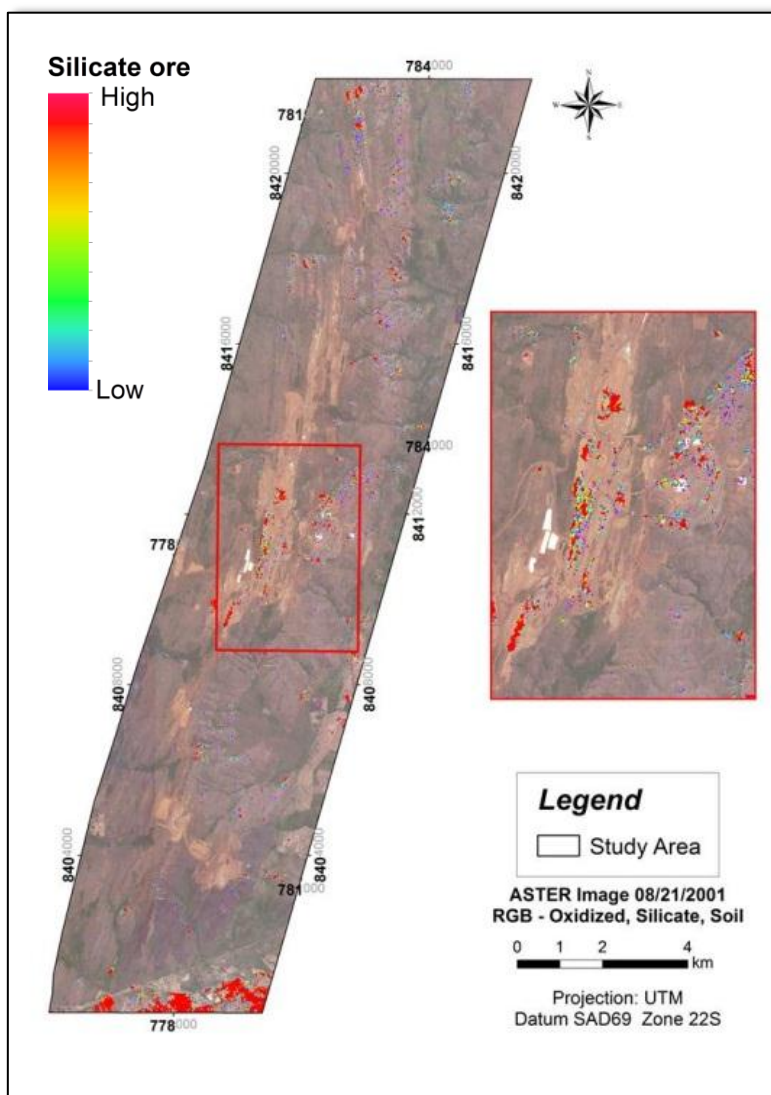


Figure 8 – Bing Maps image overlaid with the ore silicate band (red) extracted from the LSUM

The Bing Maps image overlapping the band of the silicate ore extracted from the LSUM (Figure 8a) stood out in the largest mining area of minerals exposed in the soil and weathering profile. This is due to ore genesis in Niquelândia, as the silicate mineral is found below the surface, thus being exposed only in the area being mined. Comparing the results derived by the LSUM with the use of spectral curves of the soil and oxidized ore and the band ratio $R_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}$ (Figure 5) we revealed a response very similar to that identifying features rich in Fe^{3+} thus showing that the two techniques can be used for mapping of areas rich in Fe^{3+} in the study area.

4. Conclusions

The band ratio $R_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}$, even while being a simple technique proved very effective in coverage analysis enriched in iron oxides (hematite and goethite) in the study area in Niquelândia.

The use of the LSUM method that represents a more accurate technique using spectral curves of the soil and oxidized ores and silicate, also showed areas with a predominance of minerals rich in Fe^{3+} . The results obtained with both techniques of digital processing of ASTER image were shown to be similar.

By using the spectral curve of the silicate ore with the use of LSUM gave a response from the exposure of portions of the studied area that are already in the process of extraction, since the profile of weathering lateritic ore forming silicate nickel occurs below the horizon with mineralization associated with iron minerals, represented by the oxidized ore. Thus the identification occurs only when the profile presents exposed silicate-rich ore.

The use of the band ratio technique and LSUM in ASTER image proved to be an expedient tool for locating favorable areas to explore for nickel laterite ore in Niquelândia.

5. References

- Adams, J. B., Sabol, D. E., Kapos, V., Almeida Filho, R., Roberts, D. A. R, Smith, M. O., & Gillespie, A. R. (1995). Classification of multispectral images based on fraction of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 52, 137-154.
- Baptista, G. M. M., & Meneses, P. R. (2009). Identificação de sesquióxidos de ferro da fração argila de solos tropicais por meio de decomposição espectral linear dos dados do sensor AVNIR-2 do sistema ALOS Anais..... XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, 7655-7662.
- Boldt, J.R.Jr. 1967. The winning of nickel, Toronto: Longmans Canadá Ltd, 487p.
- Bryant, R. G. (1996). Validated linear mixture modeling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, Londres, 17(2), 315-330.
- Carvalho Junior O. A.; Baptista, G. M. M.; Madeira Netto, J. S.; Martins, E. S.; Carvalho, A. P. F., & Meneses, P. R. (1998). Utilização de Dados Hiperespectrais do Sensor AVIRIS para Identificação da Feição Espectral da Ligação Magnésio-Hidroxila em Lateritos Niquelíferos. Anais..... IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p.1283-1294.
- Carvalho Junior, O. A., Carvalho, A. P. F.; Meneses, P. R.; Guimarães, R. F., & Martins, E. S. (2003). Análise de Imagens Hiperespectrais pelo Método Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (Mesma) em Depósito Supergênico de Níquel Revista Brasileira Geociências, 33(1), 63-74.

- Costa, J. L. G. (1970). Jazidas de níquel do maciço de São José do Tocantins-Notas sobre a geologia econômica e pesquisas pela Cia Níquel Tocantins. In: Congresso Brasileiro Geologia, 24, 1970. Brasília. Resumos, S.B.G., p.140-143.
- Cruz, J. R., Souza Filho, C. R., Abram, M. B., & Marcon R. (2011). Caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá (MG). Anais....XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE p.3530
- Hunt, G. R., Salisbury, J. W., & Lenhoff, C. J. (1971). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 3, 195-205.
- Lombard, J. (1956). Sur la géochimie et les gisements du nickel. *Chronique des mines d'Outre-Mer-Paris*, 244, 20p.
- Meneses, P., Pontara, R. C. P., Freitas Silva, F., & Madeira Neto, J. C. (2001). Comportamento da Reflectância Espectral de Filitos Carbonosos Mineralizados em Ouro. *The winning of nickel.*, 31(1), 83-88.
- Oliveira, S. M. B., Trescases, J. J., & Melfi, A. J. (1992). Lateritic Nickel Deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, 27(2), 137-146.
- Pedroso, A. C., & Schmaltz, W. H. (1981). Jazimentos de níquel laterítico de Niquelândia-Goiás. In: Schmartz, W. H. (coord.). *Os Principais depósitos minerais da região Centro-Oeste*. DNPM, Goiânia. 252p, p. 184-207.
- Robb, L. J. (2004). *Introduction to ore-forming processes*. Blackweel publishing, p.368.
- Rowan, L. C., & Mars, J. C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emissivity and Reflection Radiometer ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350-366.
- Santos, P. S. (1989). "Classificação, Nomenclatura e Identificação dos Argilominerais", In: Edgard Blücher, *Ciência e Tecnologia de Argilas*, 2 ed, cap. 4, vol.I, São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda.
- Shimabukuro, Y. E., & Smith, J. A. (1991). The least-squares mixing models to generate fractio images derived from remote sensing multispectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(1), 16-20.
- Sherman, D. M., & Waite, T. D. (1985). Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hidroxides in the near IR to near UV. *American Mineralogist*, 70, 1262-1269.
- Schumacher, D. (1996). Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, In: Schumacher D. & Abrams M.A. (eds.) *Hydrocarbon Migration and its Near Surface Expression* (pp 71-89). AAPG Especial 66
- Trescases, J. J., Melfi, A. J., & Oliveira, S. M. B. (1981). Nickeliferous laterites of Brazil. In: *International Seminar on Lateritisation Processes*. Trivandrum, Índia, Proceeding, 170-184.