

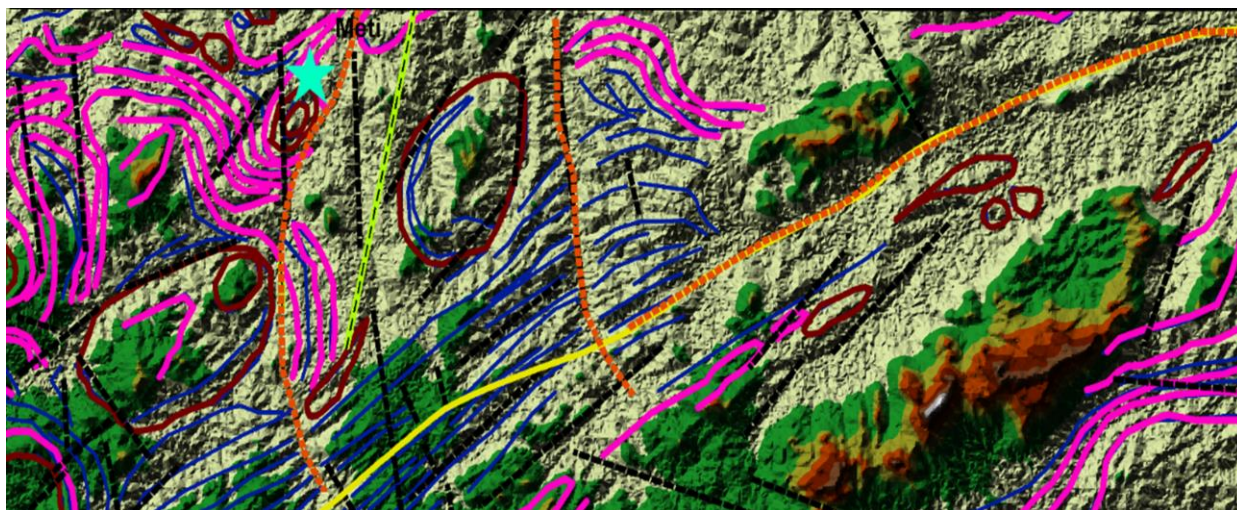


**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

LICENCIATURA EM GEOLOGIA APLICADA

PROJECTO CIENTÍFICO

**ESTUDO DA GEOLOGIA DO CINTURÃO DE LÚRIO, COM ESPECIAL
REALCE À EVOLUÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA REGIÃO DE
LALAUA-MALEMA, ATRAVÉS DO USO DE IMAGENS ASTER E SRTM.**



Autor:

Claudino Silvério Emuide Colete



**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

LICENCIATURA EM GEOLOGIA APLICADA

PROJECTO CIENTÍFICO

**ESTUDO DA GEOLOGIA DO CINTURÃO DE LÚRIO, COM ESPECIAL REALCE À
EVOLUÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA REGIÃO DE LALAUA-MALEMA,
ATRAVÉS DO USO DE IMAGENS ASTER E SRTM.**

Autor:

Claudino Silvério Emuide Colete

Supervisores:

Prof. Doutor Farisse Chirindja (UEM)

Prof. Doutor Luís Magaia (UEM)

Maputo, Novembro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este presente Projecto Científico à toda a minha família, em especial, aos meus pais, Silvério Emuide Colete e Julieta Saíde Péssula, por todo o amor, apoio e incentivo incondicional que sempre me proporcionaram.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

(Filipenses 4:13).

“O senhor é meu pastor, nada me faltará”

(Salmo 23:1).

“Elevo os meus olhos para os montes: de onde virá o socorro? O meu socorro vem do Senhor, que fez o céu e a terra.”

(Salmo 121:1-2).

“Aquele que habita no esconderijo do Altíssimo, à sombra do Onnipotente descansará. Direi do Senhor: ele é o meu Deus, o meu refúgio, a minha fortaleza, e nele confiarei.”

(Salmo 91:1-2)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer a Deus todo poderoso, pelo dom da vida, por iluminar o meu caminho e me dar forças para continuar de pé e não desistir, mesmo em momentos que o caminho da desistência parece mais curto e fácil. Agradeço ainda pela graça e sabedoria que me tem concedido, e por todas as bênçãos e oportunidades que tem me proporcionado.

Agradeço de forma especial aos meus pais, Silvério Emuide Colete e Julieta Saíde Péssula, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Agradeço imensamente por terem me dado as bases para ser a pessoa que sou hoje e por terem me ensinado valores tão importantes.

Agradeço a toda a minha família, pelo seu amor incondicional por mim, pelo apoio, incentivo e confiança, em especial as minhas irmãs, Joelma, Edma, Denícia, Agira e Josefina, aos meus sobrinhos JuJú, Asher, Kheldy e Júnior. Os agradecimentos se estendem aos meus primos, em especial ao Mano Hipólito, Mano Rizik, Mano Jussá, aos meus tios, em especial ao Tio Mello e aos demais familiares não mencionados.

O meu especial agradecimento vai ao meu amigo e colega de curso, doutor Júlio Balute, pela amizade, pelo suporte, disponibilidade em me ajudar, apoio, conselhos e pela partilha de ferramentas que foram fundamentais na elaboração deste trabalho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus Supervisores, Prof. Doutor Luís Magaia e Prof. Doutor Farisse Chirindja, pela vossa orientação, paciência e dedicação. A vossa experiência e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos, em especial ao José Machanguele e Arão Matsinhe, pela amizade, momentos de descontração que me ajudaram a manter o equilíbrio, pelo apoio e encorajamento que me ajudaram a manter o foco e a motivação. Agradeço ainda por serem o meu porto seguro nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus colegas de Curso e amigos, em especial ao Adriano Siteo e César Ferro, pelo apoio, pela amizade, pela troca de experiências, discussões enriquecedoras e pelo companheirismo durante esta minha caminhada acadêmica. Os agradecimentos se estendem aos colegas Omar Assane, Custódio Mungoi, Donaldo Ndove, Isaura Alegria, Carlota Macanja, Ruben Cunanhia e outros não mencionados.

Agradeço aos Docentes do Departamento de Geologia, pelo conhecimento que transmitiram, por suas aulas inspiradoras e pelo incentivo constante durante a minha formação acadêmica, no Departamento de Geologia.

Agradeço a todo o Corpo Técnico Administrativo (CTA) do Departamento de Geologia, em especial ao Sr. Raimundo, Sr. Guiamba, Dona Atália (*in memorian*), pela prontidão, bom tratamento e auxílio na pesquisa e busca por materiais.

Agradeço à Universidade Eduardo Mondlane, em especial ao Departamento de Geologia, por toda a estrutura e conhecimento proporcionados, pela disponibilidade do material necessário para a minha formação Acadêmica.

A todos que de forma directa ou indirecta me acompanharam durante minha jornada acadêmica, o meu ***Muito Obrigado! Thank You!! Kanimambo!!!***

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Claudino Silvério Emuide Colete**, declaro por minha honra que o presente Projecto Científico é da minha autoria, não tendo sido submetido ou apresentado em nenhuma outra instituição de ensino para obtenção de qualquer grau académico, e constitui o resultado da minha investigação. Todas as bibliografias consultadas estão devidamente citadas e referenciadas.

Maputo, Novembro de 2025

(Claudino Silvério Emuide Colete)

RESUMO

O presente projecto científico investigou a complexa evolução geológico-estrutural de uma área inserida no núcleo do Cinturão de Lúrio (Distritos de Lalaua e Malema, Nampula), uma zona de intenso cisalhamento Pan-Africano com importância na Geologia Regional de Moçambique. O trabalho aplicou e validou o uso integrado de dados de Teledetecção (imagens ASTER e SRTM) para desvendar a arquitetura da crosta terrestre em zonas de difícil acesso.

Através de um rigoroso processamento (combinação e razão de bandas ASTER para litologia e estrutura, imagens de sombra de relevo SRTM para estrutura), o estudo mapeou e descreveu os cenários geológico-estruturais locais.

Os resultados obtidos mostram que, além da confirmação das unidades gnáissicas do GTK CONSORTIUM 2006, foram distinguidas novas unidades litológicas, como corpos félsicos e depósitos aluvionares. A análise estrutural identificou as seguintes fases de deformação:

Duas fases de dobramento dúctil (F1 e F2) associadas à Orogenia Pan-Africana, com a fase F1 dominando o traço axial orientado na direcção NE-SW (paralela ao Cinturão de Lúrio). A F2 gerou dobras de interferência e estruturas circulares/elípticas associadas a actividade magmática pós-F1.

Uma fase tardia de deformação rúptil (F3), caracterizada por três famílias de falhas (dominantes NW-SE). Estas fraturas serviram de condutas para a intrusão de diques (Magmatismo pós-Pan-Africano).

Em conclusão, o trabalho demonstra a eficácia da Teledetecção para o mapeamento detalhado e validou a presença de zonas de cisalhamento (indicadores cinemáticos), as quais representam condutas estruturais cruciais para a ocorrência e prospecção de depósitos minerais associados (Skarn, Scheelita-Cassiterita e Fluorita-Helvita).

Palavras-chave: ASTER, Lalaua, combinação de bandas, razão de bandas, imagens SRTM, Complexo de Ocua, Cinturão de Lúrio

ABSTRACT

This scientific project investigated the complex geological-structural evolution of an area located in the core of the Lúrio Belt (Lalaua and Malema Districts, Nampula), a zone of intense Pan-African shear with importance in the Regional Geology of Mozambique. The work applied and validated the integrated use of Remote Sensing data (ASTER and SRTM images) to unveil the architecture of the Earth's crust in areas that are difficult to access.

Through rigorous processing (combination and ratio of ASTER bands for lithology; SRTM relief shadow images for structure), the study mapped and described the local geological-structural scenarios.

The results obtained show that, in addition to confirming the gneissic units of the GTK CONSORTIUM 2006, new lithological units were distinguished, such as felsic bodies and alluvial deposits. Structural analysis identified the following deformation phases:

Two ductile folding phases (F1 and F2) associated with the Pan-African Orogeny, with phase F1 dominating the axial trace oriented in the NE-SW direction (parallel to the Lurium Belt). F2 generated interference folds and circular/elliptical structures associated with post-F1 magmatic activity.

A late brittle deformation phase (F3), characterized by three fault families (dominant NW-SE). These fractures served as conduits for the intrusion of gabbroic dikes (post-Pan-African basic magmatism).

In conclusion, the work demonstrates the effectiveness of Remote Sensing for detailed mapping and validated the presence of shear zones (kinematic indicators), which represent crucial structural conduits for the occurrence and prospecting of associated mineral deposits (Skarn, Scheelita-Cassiterita e Fluorita-Helvita).

Keywords: *ASTER, Lalaua, band combination, band ratio, SRTM images, Ocuá Complex, Lúrio Belt*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos da Tedetecção (http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1).	5
Figura 2: Radiação eletromagnética. (http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1)....	6
Figura 3: Representação do espectro electromagnético (REM). A faixa de Luz representa a faixa do espectro visível (Moreira & Santos, 2016).....	8
Figura 4: Mapa de localização da área de estudo (fonte: dados de Cenacarta).....	12
Figura 5: Relevo e hidrografia da área de estudo proporcionada por um Modelo Digital de Elevação Global (GDEM) do sensor ASTER.....	13
Figura 6: Mapa Geológico-Estrutural de Nordeste de Moçambique, modificado de (Ueda et al., 2012).....	15
Figura 7: Mapa de geologia da área de estudo (fonte: dados de Cenacarta).	18
Figura 8: Fluxograma metodológico levado à cabo para o presente projecto.....	27
Figura 9. (A): Imagem NDVI da área de estudo. A imagem tem um intervalo de valores de -0,22 a 0,45. As áreas com um valor de NDVI acima de 0 são atribuídas à uma faixa de cor verde que são áreas com vegetação densa. As áreas com um valor de NDVI abaixo de 0 são atribuídas a uma faixa de cor violeta que correspondem às áreas menos vegetadas ou sem vegetação activa. (B): Cobertura vegetal na área de estudo. As zonas vegetadas são caracterizadas pela cor verde e concentram-se nas zonas de grande altitude à sudeste, nas margens dos principais rios e ao longo de fraturas geológicas.	29
Figura 10: Imagem de unidades litológicas enriquecidas em: (A) sílica e (B) máficos, respectivamente.	30
Figura 11: Imagem mostrando unidades litológicas enriquecidas em Sílica, máficos e composição intermédia.....	31
Figura 12: Combinação de razão de bandas 12/13, 11/12 e 13/12, destacando as rochas ricas em minerais félsicos, Máficos.	32
Figura 13: Imagem de razão de banda 13/14 do Sensor ASTER exibindo zonas ricas em carbonatos através de polígonos azuis.....	33
Figura 14: Imagem de razão de banda 2/1 do Sensor ASTER, mostrando distribuição dos óxidos de ferro.	34
Figura 15: Mapa litológico interpretativo obtido através do processamento digital de imagens ASTER.....	36

Figura 16: Estruturas deformacionais dúcteis de composição colorida 742 destacando a divisão dos domínios estruturais.....	38
Figura 17: Imagem de relevo sombreado (azimute 315,200,100) graus e inclinação do sol de 45,50,60, graus), destacando as principais famílias de lineamentos.....	40
Figura 18: Imagem de composição colorida 751 mostrando as diferentes orientações de falhas e os diques.....	40
Figura 19: Imagem da síntese da geologia estrutural, apresentando a relação entre as estruturas dúcteis e rúpteis presentes na área de estudo.	42
Figura 20: Mapa Geológico-Estrutural actualizado da área de estudo, produzida através de interpretação de imagens de satélite.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Os cinco aspectos considerados sobre a radiação electromagnética (Sousa & Silva, 2011).....	6
Tabela 2: Descrição das bandas de Imagens ASTER e suas aplicações. (Adaptado de Yajima, 2014 e JOGMEC, 2015).....	10
Tabela 3: Tabela descritiva dos complexos geológicos, suas idades e respectivas unidades litológicas dominantes regionalmente na área de estudo.	15
Tabela 4: Índices de minerais usados no mapeamento litológico, realçados através das razões calculadas a partir das bandas termais do sensor ASTER e as respectivas feições.	25

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Combinação da topografia com os elementos estruturais da área de estudo e os seus respectivos domínios.	61
Anexo 2: Relevo versus estruturas geológicas.	62
Anexo 3: Modelação em 3D da área de estudo, vista de cima, as zonas com coloração branca representam zonas de planícies, por onde atravessam os rios e onde se localizam os aluviões mapeados.....	63
Anexo 4: Modelação em 3D da área de estudo, vista frontal esquerda, os corpos insolados de coloração verde, amarelo e vermelho representam os corpos puramente félsicos.....	64
Anexo 5: Modelação em 3D da área de estudo, vista traseira direita.	65

Anexo 6: <i>Modelação em 3D da área de estudo, vista traseira esquerda.</i>	66
Anexo 7: <i>Máscara de Vegetação da área de estudo aplicada na imagem ASTER. A cor preta representa vegetação muito densa.</i>	67
Anexo 8: <i>Máscara de Vegetação Invertida da área de estudo. A cor branca representa vegetação muito densa.</i>	68
Anexo 9: <i>Mapa litológico interpretativo obtido através do processamento digital de imagens ASTER.</i>	69
Anexo 10: <i>Biblioteca espectral da área de estudo.</i>	70
Anexo 11: <i>Descrição das bandas de Imagens ASTER (Yajima, 2014 e JOGMEC, 2015).</i>	71
Anexo 12: <i>Principais razões de banda do sensor ASTER usados na cartografia digital (Elsaid et al., 2014; Hashim e Beiranvand, 2011; Kujjo, 2010; Zou, 2013; Aboelkhair et al., 2009; Pour e Hashim, 2014; Shafaroud e Karimpour, 2013).</i>	72
Anexo 13: <i>Common ratio and band combinations from ASTER data. (Kalinowski and Oliver, 2004, citado por Zou & Zou, 2013).</i>	73
Anexo 14: <i>Espectros de emissividade térmica de rochas ígneas com diferentes teores de sílica e quartzo (mudança dos mínimos para comprimentos de onda mais curtos à medida que o conteúdo de sílica aumenta). (Sabins, 1999).</i>	75
Anexo 15: <i>Índices minerais para o sensor ASTER usando razões de bandas. (Cudahy, et al., 2006).</i>	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviatura	Definição
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiómetro de Emissão e Reflexão Termal)</i>
CENACARTA	<i>Centro Nacional de Cartografia e Teledeteccção;</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação)</i>
DN	<i>Digital Number (Número Digital)</i>
DNGM	<i>Direcção Nacional de Geologia e Minas</i>
E	<i>Este</i>
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>

	<i>(Ambiente de Visualização de Imagens)</i>
EOS-1	<i>Earth Observation Satellite-1 (Satélite de Observação da Terra)</i>
F1	<i>Dobras de ordem 1</i>
F2	<i>Dobras de ordem 2</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (Análise Atmosférica de Hipercubos Espectrais de Linha de Visão Rápida)</i>
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação Global)</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format (Formato de Dados Hierárquicos)</i>
IC	<i>Índice de Carbonatos</i>
IM	<i>Índice de Minerais Máficos</i>
IS	<i>Índice de Sílica</i>
Km	<i>Quilômetro</i>
MAE	<i>Ministério de Administração Estatal</i>
N	<i>Norte</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço)</i>
NDVI	<i>Normalize Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada)</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency (Agência Nacional de Inteligência Geoespacial)</i>
NE	<i>Nordeste</i>
NW	<i>Noroeste</i>
REM	<i>Radiação Electromagnética</i>
RGB	<i>Vermelho, Verde, Azul</i>
S	<i>Sul</i>
S1	<i>Foliações de ordem 1</i>
S2	<i>Foliações de ordem 2</i>
SE	<i>Sudeste</i>
SW	<i>Sudoeste</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission (Missão Topográfica de Radar Embarcado)</i>
SIG	<i>Sistema de Informação Geográfica</i>
SWIR	<i>Shortwave Infrared (Infravermelho de Ondas Curtas)</i>
TIR	<i>Thermal Infrared (Infravermelho Termal)</i>

USGS	<i>United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator Coordinate System (Sistema Universal Transverso de Mercator)</i>
V3	<i>Versão 3</i>
VNIR	<i>Visible and Near-Infrared (Visível e Infravermelho Próximo)</i>
W	<i>Oeste</i>
WGS	<i>World Geodetic System (Sistema Geodético Mundial)</i>

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
DECLARAÇÃO DE HONRA	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ANEXOS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	IX
1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objectivos	2
1.2.1. Objectivo Geral:	2
1.2.2. Objectivos Específicos:	2
1.3. Relevância do Estudo.....	2
2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. O princípio da Teledeteccção	4
2.1.1. Radiação Electromagnética	5
2.1.2. O Espectro Electromagnético	7
2.2. Satélite Terra.....	8
2.2.1. Sensor ASTER	8
a) ASTER GDEM	11
2.3. Sensor SRTM.....	11
3. CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.1. Localização Geográfica e Acessos	12

3.2. Clima, Relevo e Hidrografia	12
4. CAPÍTULO IV: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....	14
4.1. Geologia Regional	14
4.2. Geologia Local.....	17
4.3. Geologia Económica e Mineração da Área de Estudo	17
5. CAPÍTULO V: MATERIAIS E METODOLOGIA	20
5.1. Materiais e Softwares.....	20
5.2. Metodologia	21
5.2.1. Revisão Bibliográfica	21
5.2.2. Aquisição de Dados	21
5.2.3. Pré-Processamento	21
a) Reamostragem das Bandas	22
b) Correção Radiométrica	22
c) Correções Atmosféricas	22
❖ <i>FLAASH Atmospheric Correction</i>	23
❖ <i>Thermal Atmospheric Correction</i>	23
d) ROI (<i>Region Of Interest</i>).	23
5.2.4. Processamento Digital de Imagens.....	24
5.2.5. Índice de Vegetação (NDVI).....	24
5.2.6. Máscara da Vegetação	24
5.2.7. Mapeamento Litológico.....	24
5.2.8. Razões de Bandas	25
5.2.9. Índices de Minerais.....	25
5.2.10. Composições Coloridas	26
5.2.11. Mapeamento Estrutural.....	26
5.2.12. Integração dos Dados.....	26
6. CAPÍTULO VI: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	28

6.1.	Cobertura Vegetal	28
6.2.	Mapeamento Litológico	29
6.2.1.	Índice de Sílica (IS)	30
6.2.2.	Índice de Máficos (IM).....	30
6.2.3.	Composição de Bandas de Minerais Félsicos e Máficos.....	31
6.2.4.	Índice de Carbonatos (IC).....	32
6.2.5.	Índice de Óxidos de Ferro	33
6.2.6.	Unidades Mapeadas	34
6.3.	Mapeamento Estrutural.....	37
6.3.1.	Deformação Dúctil	37
a)	Domínio A	37
b)	Domínio B.....	37
c)	Domínio C.....	38
6.3.2.	Deformação Rúptil	39
a)	Lineamentos.....	39
a)	Falhas e Diques	40
6.3.3.	Síntese da geologia estrutural.....	41
7.	CAPÍTULO VII: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
7.1.	Contexto Litológico	43
7.2.	Contexto Estrutural	45
7.2.1.	Deformação Dúctil	45
7.2.2.	Deformação Rúptil	47
7.2.3.	Falhas de Cisalhamento.....	47
7.2.4.	Estruturas Circulares/elípticas	48
7.2.5.	Diques.....	48
8.	CAPÍTULO VIII: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	50
8.1.	Conclusões.....	50

8.2. Recomendações	50
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	60

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Introdução

A área de estudo insere-se no complexo e geocronologicamente importante Cinturão de Lúrio (Complexo de Ocuá), no nordeste de Moçambique. Esta região é dominada por litologias granulíticas e rochas fortemente deformadas e milonizadas, estando integrada numa extensa faixa de cisalhamento que foi repetidamente reactivada durante a evolução crustal do Neoproterozoico (Orogenia Pan-Africana) (Engvik et al., 2007; Viola et al., 2008). A arquitetura crustal, em larga escala, e as fases de deformação polifásicas (F1, F2 e F3) que ocorreram entre o Mesoproterozoico Câmbrico (Ueda et al., 2012) são o principal controlo da geologia e do potencial mineralógico da região.

Devido à sua complexidade estrutural e às limitações de acessibilidade terrestre, o mapeamento geológico detalhado desta região exige uma ferramenta que combine a alta resolução com a capacidade de cobrir extensas áreas de forma eficiente e a baixo custo. Nos últimos anos, a Teledetecção e o Processamento Digital de Imagens tornaram-se ferramentas indispensáveis e de elevada credibilidade nas geociências para o mapeamento geológico e estrutural, especialmente em contextos tectónicos complexos como o do Cinturão de Lúrio.

Assim, para desvendar o cenário geológico e estrutural desta região, o presente trabalho baseia-se na aplicação integrada de dois sensores de vanguarda:

O sensor **ASTER** (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), lançado em 1999, que fornece dados multiespectrais de alta resolução, sendo os seus canais próximos na região do Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) e Térmicas (TIR) cruciais para a identificação espectral de rochas, minerais e estruturas geológicas (Kujjo, 2010; Zou & Zou, 2013).

O sensor **SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission), lançado em 2000, que gera Modelos Digitais de Elevação (DEM) de alta resolução, essenciais para a morfometria e para a identificação de estruturas geológicas (lineamentos) em ambientes de relevo complexo (Andrades, 2010).

A aplicação destas técnicas em Moçambique tem-se difundido como uma ferramenta eficaz em vários trabalhos de mapeamento geológico-estrutural, prospecção e pesquisa de mineralizações (Nopeia, 2016; Unganai, 2016; Tembe, 2016; Viegas, 2019; Júlio, 2024; entre outros).

Deste modo, o presente trabalho visa dar um contributo significativo no conhecimento da evolução geológico-estrutural da área de estudo, validando a eficácia da aplicação integrada de imagens ASTER e SRTM para actualizar o mapeamento existente e identificar os principais controlos estruturais.

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo Geral:

- Estudar a evolução geológico-estrutural da região de Lalaua e Malema, Cinturão de Lúrio, com base nas técnicas de teledetecção em imagens ASTER e SRTM.

1.2.2. Objectivos Específicos:

- Mapear e classificar os litótipos aflorantes, com ênfase na discriminação do protólito félsico através da análise espectral ASTER.
- Identificar e descrever as principais estruturas geológicas (lineamentos, falhas) e caracterizar as fases de deformação dúctil (F1, F2) e rúptil (F3).
- Avaliar a eficácia da aplicação da Teledetecção (ASTER e SRTM) no detalhamento da informação geológica-estrutural, confrontando os resultados com a cartografia histórica do GTK CONSORTIUM, 2006.
- Elaborar a Carta Geológico-Estrutural actualizada da área de estudo, na escala 1:150.000, para servir de base à prospecção de depósitos minerais associados.

1.3. Relevância do Estudo

A área de estudo insere-se no Cinturão de Lúrio, uma zona fundamental da geologia do Nordeste de Moçambique. Esta região compreende uma faixa de intenso cisalhamento repetidamente reactivada e é caracterizada por rochas fortemente deformadas e milonizadas, representadas pelo Complexo de Ocuca (Engvik et al., 2007). A sua complexidade torna-a um alvo de especial atenção para estudos que visam desvendar o cenário geológico-estrutural e a história da deformação Pan-Africana.

A relevância e o ganho deste projecto científico são estabelecidos em três vertentes cruciais:

Relevância Metodológica e Territorial: O projecto demonstra a eficácia e o baixo custo da aplicação integrada de técnicas avançadas de Teledeteção (ASTER e SRTM) para o mapeamento de estruturas geológicas em zonas remotas e de difícil acesso por via terrestre (Meneses & Almeida, 2012). O uso de dados de alta resolução actualiza a cartografia geológica existente, fornecendo uma base posicional precisa (WGS 1984) para estudos subsequentes.

Relevância Geológica Regional: O estudo contribui diretamente para o conhecimento da história da deformação das rochas no núcleo do Cinturão de Lúrio. Ao identificar e descrever as fases de deformação F1, F2 e F3 e as suas orientações, o projecto fornece dados estruturais detalhados que são essenciais para a construção de modelos geodinâmicos que descrevem a arquitetura crustal de Moçambique.

Relevância Económica e Prospetiva Nacional: O principal resultado económico é a identificação e delimitação das falhas e zonas de cisalhamento mais importantes. Estas estruturas são canais estruturais cruciais que controlam a circulação de fluidos hidrotermais. Assim, o mapeamento destas zonas de fragilidade cria alvos prioritários e direciona a prospecção mineral para as ocorrências minerais esperadas na área, como depósitos tipo Skarn (Mo, Zn, Cu), Scheelita-Cassiterita (W, Sn, Mo) e Fluorita-Helvita (Be, F, B) (Cavalcante, et al., 2010).

2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O princípio da Teledetecção

A Teledetecção é um processo ou conjunto de técnicas que consiste na obtenção de informações relacionadas com um objecto, área ou fenómeno, através da análise de dados adquiridos por um dispositivo que não esteja em contacto com o objecto, área ou fenómeno sob investigação (Lillesand & Kiefer, 2000). Esta aquisição tem desempenhado uma função preponderante no mapeamento geológico e estrutural com vista a localizar depósitos minerais e, no reconhecimento de alterações hidrotermais através das suas assinaturas espectrais (Hajimirzajan et al., 2012).

A aquisição de informação é feita através do registo da energia reflectida ou emitida (sob a forma de radiação eletromagnética) pelo objecto a detectar (Sousa & Silva, 2011). O sol, principal fonte de radiação eletromagnética (REM), ilumina a superfície terrestre. A energia proveniente do sol propaga-se na atmosfera, em seguida, a REM interage com a superfície terrestre, sendo parte reflectida e parte é absorvida para ser emitida sob forma de calor. A REM reflectida e/ou emitida é capturada, medida e registrada pelo sistema sensor, para ser em seguida, enviada à estação de recepção na Terra. Posteriormente esses dados (imagens digitais), são tratados para gerar informações úteis que serão utilizadas pelo usuário final, na construção de mapas, no planejamento e gestão do espaço (Almeida & Oliveira, 2010).

Isto é exemplificado pelos sistemas de aquisição de imagens, onde estão envolvidos os seguintes 7 elementos que descrevem o processo da teledetecção (Sousa & Silva, 2011), de jusante para montante, até atingir o seu objetivo final (figura 1):

- A. **Fonte de energia ou iluminação:** o primeiro requerimento é a existência de uma fonte de energia que ilumine ou forneça radiação eletromagnética ao objecto em estudo.
- B. **A radiação e a atmosfera:** a energia emitida pela fonte entra em contacto e interage com a atmosfera que atravessa na sua viagem até ao objecto. Esta interacção pode ter lugar uma segunda vez, quando a energia é reflectida pelo objecto para o sensor.
- C. **Interacção com o objecto:** após a energia ter atingido o objecto, passando pela atmosfera, esta interage com o objecto dependendo das propriedades do objecto e da radiação.
- D. **Registo da energia pelo sensor:** após a energia ter sido difundida ou emitida pelo objecto, é necessário um sensor (remoto – que não se encontre em contacto com o alvo) para recolher e registar a radiação eletromagnética.

- E. **Transmissão, recepção e processamento:** a energia registada pelo sensor é transmitida, normalmente de forma electrónica, para uma estação que recebe e processa os dados para uma imagem.
- F. **Interpretação e análise:** a imagem processada é interpretada, visual e/ou digitalmente, de forma a extrair informação sobre o objecto iluminado.
- G. **Aplicação:** o objetivo final do processo de teledeteção é atingido quando aplicamos a informação que conseguimos extrair da imagem do objecto, de modo a compreendê-lo melhor, revelar novas informações, ou contribuir para a resolução de um determinado problema.

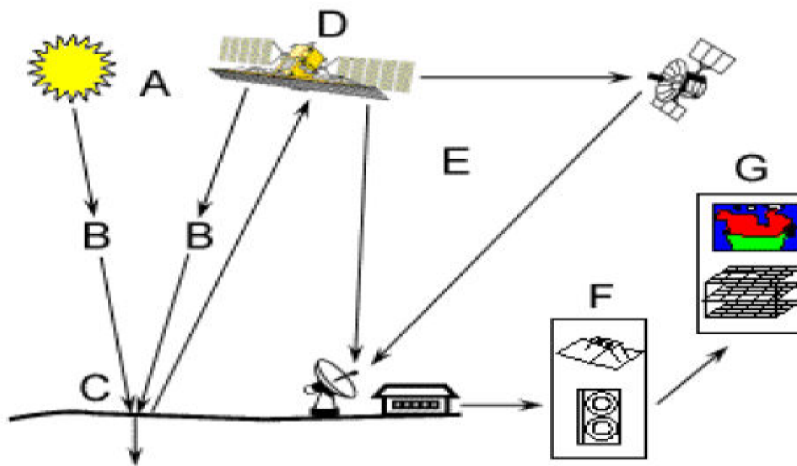


Figura 1: Processos da Teledeteção (<http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>).

2.1.1. Radiação Electromagnética

A radiação electromagnética corresponde a forma de energia de interesse à teledeteção, sendo a única que não necessita de um meio material para se propagar. O exemplo de energia radiante ou electromagnética mais familiar e de maior relevância à teledeteção é a energia solar, que se propaga pelo espaço desde o sol até a Terra (Venturieri, 2007).

A luz ou radiação electromagnética (REM) é uma forma de energia que é transferida num certo período de tempo, de um ponto para o outro. A descrição da REM passa, portanto por um aspecto energético e um aspecto temporal. A REM apenas é perceptível (visível, sensível ou mensurável) assim que colidir com uma determinada superfície. Portanto a terceira dimensão a considerar será a dimensão espacial. Um quarto aspecto a ser considerado, é a distribuição hemisférica da REM: a REM, que chega a uma determinada superfície, varia com a orientação. Este aspecto direccional

pode ser contabilizado se subdividirmos o hemisfério num grande número (infinitamente pequeno) de ângulos sólidos e considerar a contribuição de cada um deles. O quinto e último aspecto deve-se à componente espectral: a radiação é composta por diferentes comprimentos de onda (Sousa & Silva, 2011). Os cinco aspectos mencionados estão sumariados na Tabela 1.

Tabela 1: Os cinco aspectos considerados sobre a radiação electromagnética (Sousa & Silva, 2011).

Energético	Energia	Q	Joule	J
Temporal	Tempo	t	Segundo	S
Espacial	Superfície	A	Metro quadrado	m ²
Direcional	Ângulo sólido	Ω	Sterad	Sr
Espectral	Comprimento de onda	λ	Micrómetro=10 ⁻⁶ m	μm
			Nanómetro=10 ⁻⁹ m	nm

A radiação electromagnética consiste num campo eléctrico (E) que varia em magnitude na direcção perpendicular à direcção em que a radiação viaja, e um campo magnético (M) formando um ângulo recto com o campo eléctrico (figura 2). Ambos os campos viajam à velocidade da luz (Sousa & Silva, 2011).

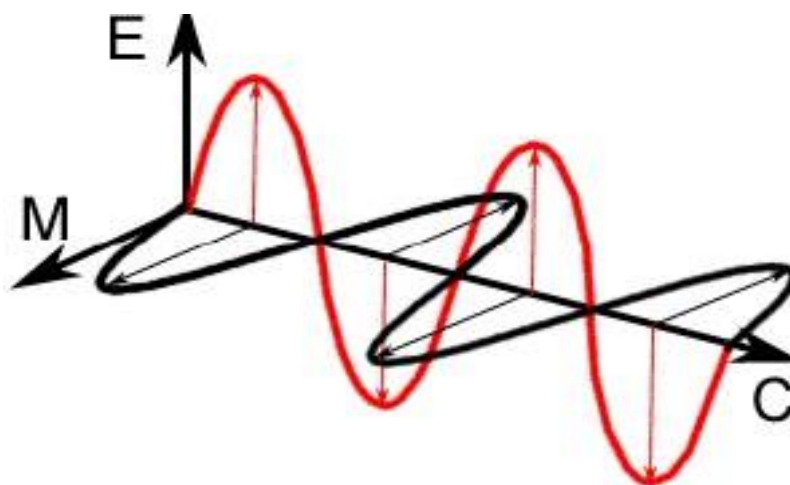


Figura 2: Radiação eletromagnética. (<http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>).

2.1.2. O Espectro Electromagnético

O Espectro Electromagnético é subdividido em faixas com características físicas peculiares, tais como Ondas de Rádio, Microondas, Infravermelho, Visível, Ultravioleta, Raios-X e Raios-Gama (Venturieri, 2007). Para o estudo da geologia com o sensor ASTER, destacam-se três regiões críticas:

Região do Visível e Infravermelho Próximo (VNIR): Corresponde à radiação percebida pelo olho humano (0.4 a 0.7 μm), sendo produzida pela luminescência ou por corpos quentes. Esta faixa é importante porque a reflectância nesta região está relacionada com a cor dos materiais e com a presença de óxidos de ferro e minerais de alteração na superfície rochosa (Venturieri, 2007).

Região do Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR): Estende-se de 1.0 a 2.5 μm . Esta região é de extrema importância para o mapeamento litológico pois deteta a energia refletida, sendo sensível à presença de grupos funcionais de hidroxila (Al-OH, Mg-OH) e carbonatos em minerais. Estes grupos são indicadores chave de alteração hidrotermal e da composição dos minerais em rochas metamórficas (como as).

Região do Infravermelho Termal (TIR): Abrange comprimentos de onda superiores a 3 μm . Nesta região, a energia medida é emitida pelos corpos aquecidos (efeito de aquecimento). O TIR é essencial para o seu projecto, pois permite medir a emissividade das rochas, fornecendo dados cruciais sobre o teor de sílica (SiO_2) e a distinção de silicatos e não-silicatos, o que é fundamental para a discriminação do seu protólito félsico (Sabins, 1999).

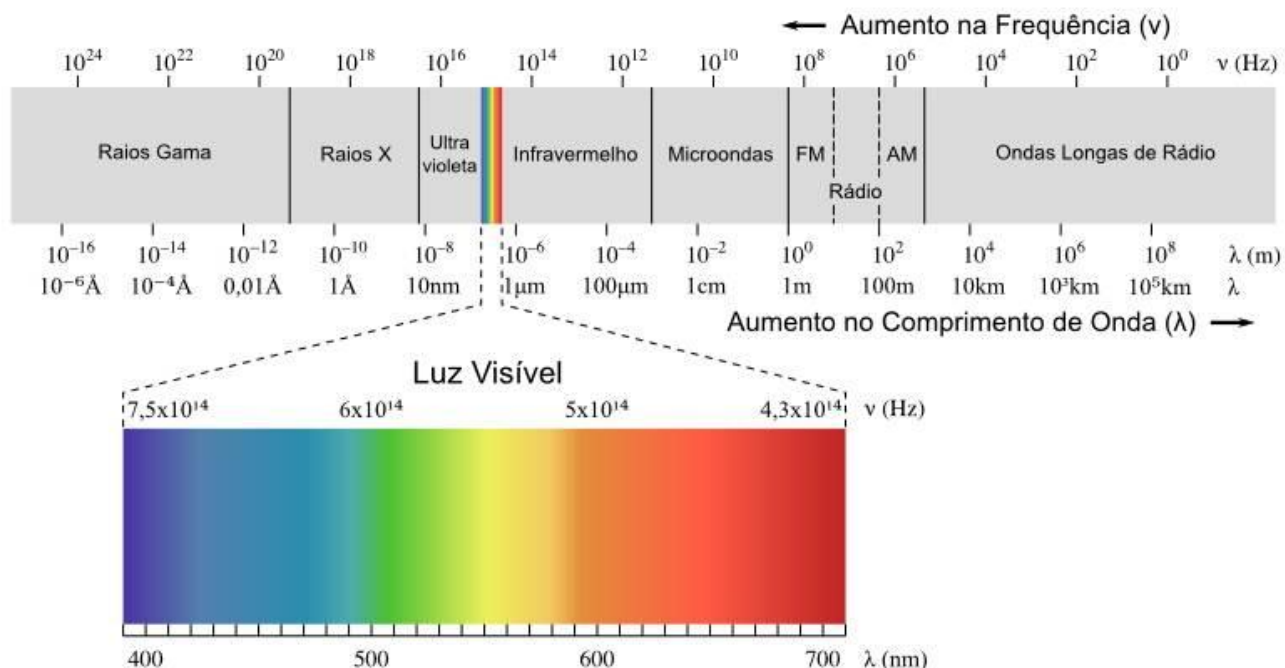


Figura 3: Representação do espectro electromagnético (REM). A faixa de Luz representa a faixa do espectro visível (Moreira & Santos, 2016).

2.2. Satélite Terra

A plataforma orbital TERRA foi lançada em 18 de Dezembro de 1999, como parte do programa *Earth Observing System* (EOS), da NASA e tem por objetivo principal adquirir dados que possam aumentar nossos conhecimentos sobre a dinâmica atmosférica global, sobre a interacção terra, oceano e atmosfera. Estes dados começaram a ser adquiridos em Fevereiro de 2000. Actualmente existem três satélites do programa EOS em órbita e pretendem-se lançar outros quinze durante os próximos anos. A bordo do satélite TERRA estão vários sensores: MODIS, **ASTER**, CERES, MISR e MOPITT (Sousa & Silva, 2011).

2.2.1. Sensor ASTER

Este sensor abrange uma ampla região do espectro electromagnético, partindo do visível para infravermelho térmico, com 14 bandas de alta resolução espacial, espectral e radiométrica. A ampla região é coberta por três telescópios, subdivididos em três subsistemas: três bandas do espectro visível e infravermelho próximo (VNIR) com uma resolução espacial de 15 m, seis bandas no espectro infravermelho de ondas curtas (SWIR) com uma resolução espacial de 30 m, e cinco bandas no espectro infravermelho térmico (TIR) com uma resolução espacial de 90 m, cobrindo

uma área com cerca de 3600 km² (tabela 2). Os materiais geológicos apresentam características espectrais distintas na região do infravermelho termal (TIR), em comparação com a região do VNIR e SWIR, devido à vibração de Si-O-Si. A discriminação de litologias em imagens ASTER é feita através de medição da energia electromagnética emitida na região do TIR (Elsaid et al., 2014).

A banda 3 (0.76-0.86µm) tem telescópios no Nadir (banda 3N) e um virado para trás (banda 3B), para formar estéreo-pares ao longo da faixa a partir de uma única órbita. Essa capacidade permite a produção e o cálculo de DEM detalhado. Um DEM, é uma representação digital do *raster* da topografia ou terreno da superfície do solo. Cada célula *raster* (ou pixel), tem um valor correspondente à sua altitude acima do nível do mar. A topografia é um dos principais atributos da superfície terrestre. Os DEMs são utilizados em inúmeras aplicações: na extração de parâmetros de terreno, modelação de fluxo de água, criação de mapas de relevo, análise de terreno em geomorfologia, geografia e muito mais. Os dados morfométricos, como a declividade, os gradientes, aspecto da encosta e as redes hidrográficas podem ser extraídas automaticamente dos DEMs (Gupta, 2018).

Tabela 2: Descrição das bandas de Imagens ASTER e suas aplicações. (Adaptado de Yajima, 2014 e JOGMEC, 2015).

Zona	Número da Banda	Faixa Espectral (μm)	Resolução Espacial	Níveis de Quantização Radiométrica	Aplicação
VNIR	1	0.52 – 0.60	15m	8 bits	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação de óxidos e minerais de ferro
	2	0.63 – 0.69			
	3N	0.78 – 0.86			
	3B	0.78 – 0.86			
SWIR	4	1.600 – 1.700	30m	8 bits	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação da cobertura vegetal • Mapeamento de estruturas geológicas.
	5	2.145 – 2.185			
	6	2.185 – 2.225			
	7	2.235 – 2.285			
	8	2.295 – 2.365			
	9	2.360 – 2.430			
TIR	10	8.125 – 8.475	90m	12 bits	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação e mapeamento de rochas ricas em sílica • Identificação de Carbonatos
	11	8.475 – 8.825			
	12	8.925 – 9.275			
	13	10.25 – 10.95			
	14	10.95 – 11.65			

a) ASTER GDEM

A primeira versão de DEM Global do sensor ASTER foi lançado em Junho de 2009 e cobre a maior parte da superfície da terra (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>).

Em agosto de 2019 a equipa científica do ASTER lançou a versão 3 do DEM Global (GDEM) baseado na correlação estéreo de 1.8 milhões de cenas ASTER. O DEM tem pontos de latitude e longitude de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros) e empregou o mascaramento das nuvens para evitar os pixéis contaminados por nuvens. Foi desenvolvido um software personalizado para reduzir ou eliminar artefactos encontrados em versões anteriores do GDEM e para preencher lacunas devidos ao mascaramento de cada bloco. O GDEM de 1°x1° foi inspecionado manualmente para verificar a integridade da remoção da anomalia, que foi geralmente excelente, excepto em algumas grandes camadas de gelo (Abrams, et al., 2020).

O GDEM cobre toda a superfície terrestre, desde os 83° de latitude norte até 83° de latitude sul. Este é um conjunto de dados de elevação digital global exclusivo e de alta resolução espacial, disponível para todos os utilizadores sem qualquer custo (Abrams, et al., 2020).

2.3. Sensor SRTM

O sensor SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi lançado no espaço em 11 de Fevereiro de 2000, através da *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) e *National Geospatial Intelligent Agency* (NGA), bem como da participação das agências espaciais da Alemanha e Itália. O objectivo era obter imagens interferométricas de passagem únicas, para serem usadas na geração de DEM de alta resolução. O banco de dados gerado é quase global, cobrindo 80% da superfície terrestre. O sensor usa duas antenas de radar, que captam imagens com 90 m de resolução espacial, reunindo informações que resultam no mapeamento topográfico do globo. Para gerar os DEMs, as duas antenas de radar localizavam-se, uma no compartimento de carga útil e do ônibus espacial, outra instalada na extremidade de mastro de 60 m, que se estendia do compartimento de carga útil quando o ônibus espacial estava no espaço. O sensor usou uma técnica chamada interferometria de radar, na qual duas imagens de radar são tiradas de locais ligeiramente diferentes. As diferenças entre estas imagens, permitem o cálculo da elevação ou mudança da superfície terrestre. O SRTM foi lançado em uma órbita com inclinação de 57°. Isso permitiu que maior parte da superfície terrestre que fica entre 60° norte e 56° sul de latitude, fosse coberta pelos radares SRTM. Os DEMs do sensor SRTM permitem identificar formas de relevo e estruturas geológicas como lineamentos, etc. (Andrades, 2010).

3. CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização Geográfica e Acessos

A área em estudo insere-se nos distritos de Lalaua e Malema (Província de Nampula), Norte de Moçambique. Grande parte da mesma enquadra-se no Distrito de Lalaua, à sensivelmente 50 km para Oeste da vila de Lalaua, é limitada a Sul pelo Distrito de Ribauê, a Norte pelo Rio Lúrio, a Este pelo Distrito de Mecuburí, e a Oeste pelo Distrito de Malema como ilustra a figura 4, ocupando uma área de aproximadamente 1200 km². O acesso à área de estudo é feito a partir de via terrestre, por meio de estradas a destacar: Namicuna-Metí, Namige-Metí e Nacuca-Metí. Todas vias passam pelo Posto Administrativo de Metí.

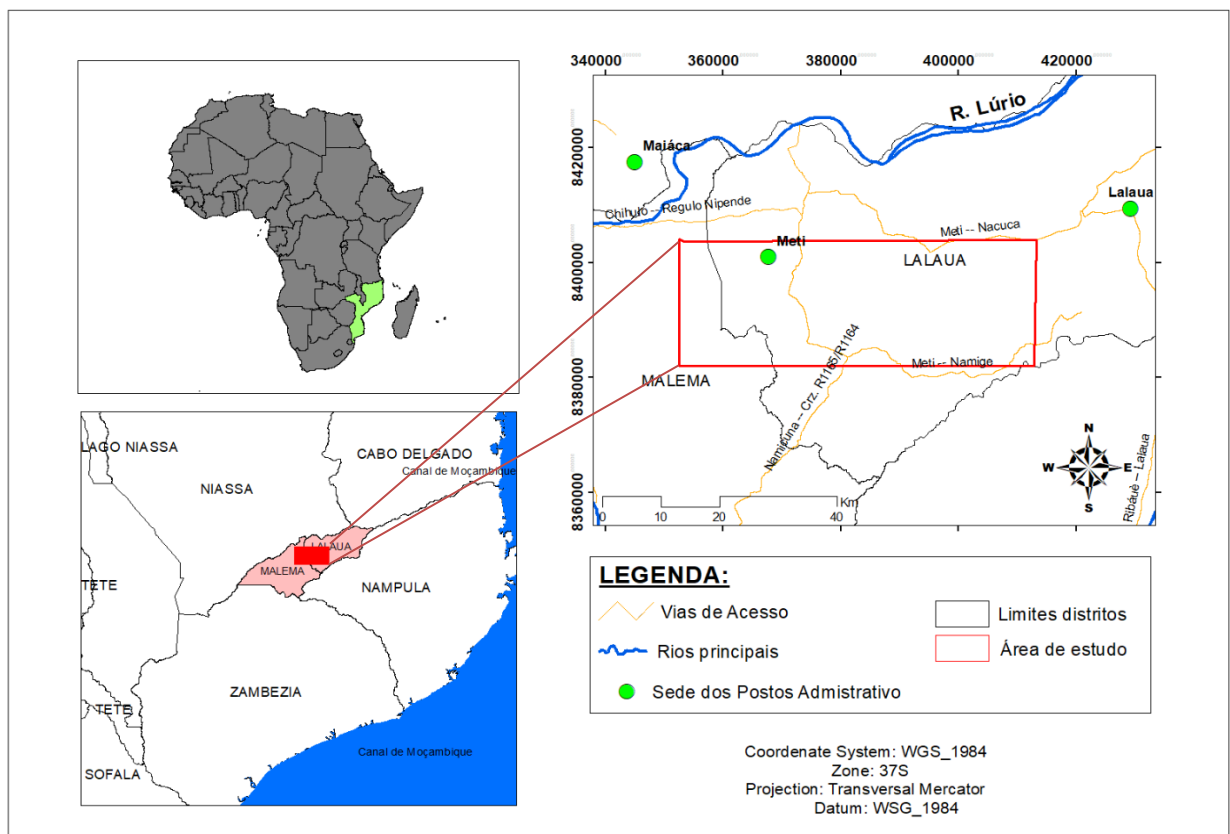


Figura 4: Mapa de localização da área de estudo (fonte: dados de Cenacarta).

3.2. Clima, Relevo e Hidrografia

O Distrito de Lalaua é dominada por clima do tipo semi-árido e sub-húmido seco com precipitações que variam de 800 – 1200 mm e evapotranspirações entre 1300 – 1500 mm. As temperaturas anuais

variam de 20 – 25° C (MAE, 2005a). O Distrito de Malema é dominada por clima tropical húmido com duas estações: a fresca e seca, de Abril à Outubro; e a quente e chuvosa de Novembro à Março (MAE, 2005b).

A rede hidrográfica da área é bastante rica. O Rio Lúrio é o principal da região e apresenta vários afluentes. Dos rios que atravessam a área de estudo destacam-se: Neôce, Meti, Muco, Mumazi, Mepeua, Mucurrura e Nivata, como ilustra a figura 5. O escoamento superficial na região é difuso e lento o que contribui de forma significativa para o fluxo de água subterrânea, principalmente em zonas cujos aquíferos são sedimentares arenosos de granulometria grossa (MAE, 2005).

Uma parte considerável dos distritos de Lalaua e Malema é de altitudes que variam de 241 e 2353m com relevo ondulado. Fisiograficamente, a área de estudo é constituída por planaltos e montanhas.

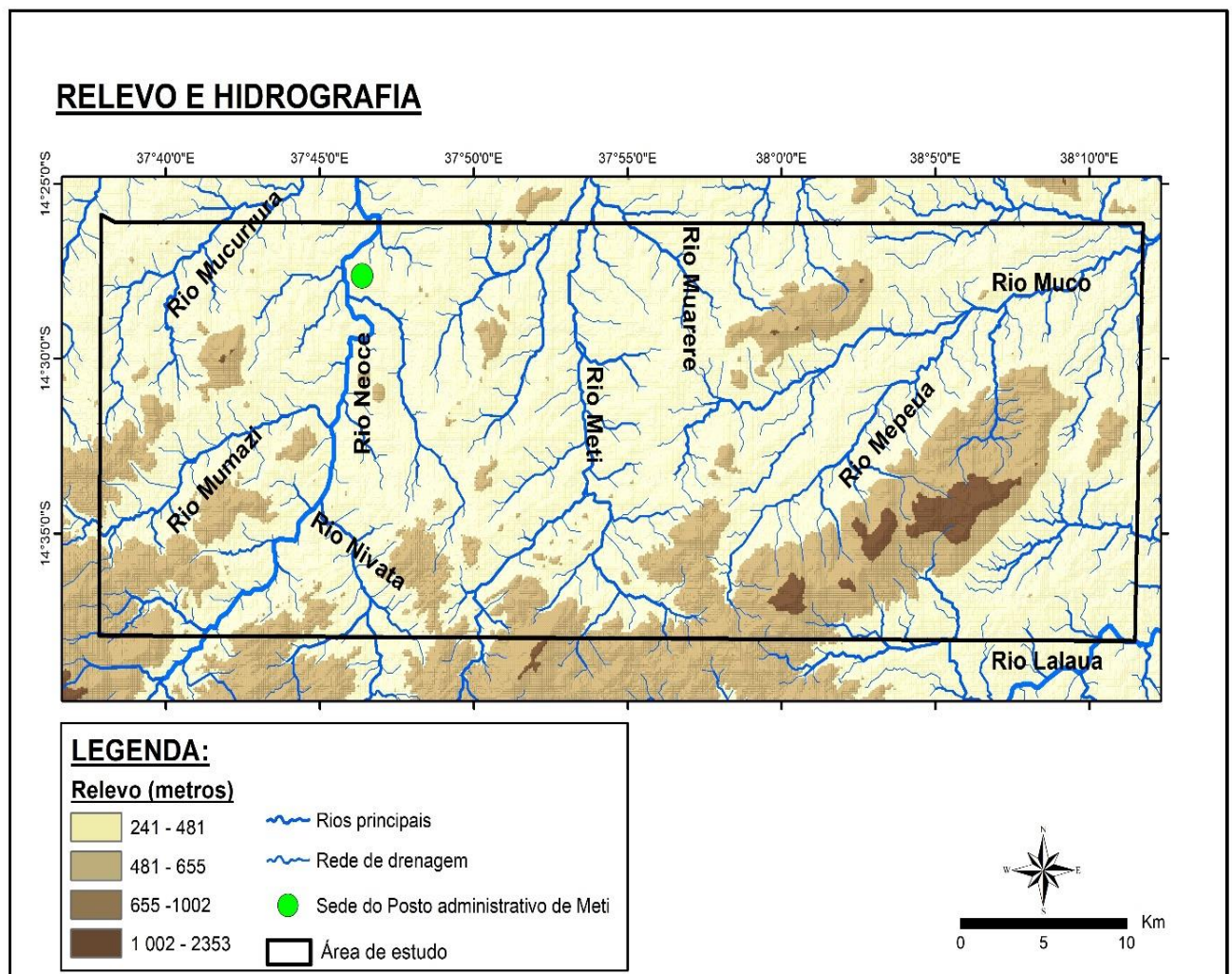


Figura 5: Relevo e hidrografia da área de estudo proporcionada por um Modelo Digital de Elevação Global (GDEM) do sensor ASTER.

4. CAPÍTULO IV: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

4.1. Geologia Regional

A área em estudo enquadra-se no Cinturão de Moçambique, definido por (Holmes, 1951). Este Cinturão datado de cerca de 1300 Ma representa, segundo (Holmes, 1951) citado por (Pinna et al., 1993), a parte centro-sul da Orogenia Leste Africana e que se distingue do resto da Orogenia através de descontinuidades estruturais entre o Cratão da Tanzânia e outros terrenos geológicos a Leste.

A Orogenia Este Africana-Antártica está representada em Moçambique pelo Cinturão de Moçambique, como resultado da colisão dos blocos continentais do Gondwana Este e Oeste. O Cinturão de Moçambique é segmentado pelo Cinturão de Lúrio, que compreende uma zona de intenso cisalhamento repetidamente reactivado, e que forma uma estrutura linear com orientação ENE-WSW. (Kröner & Stern, 2005).

A área de estudo enquadra-se no Núcleo do Cinturão de Lúrio (Complexo de Ocuca) que trunca o Cinturão de Moçambique. A intensidade das deformações que afectaram o cinturão de Lúrio manifesta-se através de diversos tipos de estruturas desde dobras, falhas, foliações, lineações e zonas de cisalhamentos (Rosse, 2009); enquanto que os processos magmáticos posteriores são representados, para além de diques, veios e filões pegmatíticos, por intrusões de diversas geometrias, como é o caso de granitos, monzogranitos e sienitos de geometrias sub-circulares a elípticas (Grantham et al., 2011).

As principais estruturas de ocorrência regional que deformam em grande escala o soco cristalino são a antiforme de Marrupa, sinforme de Ticué, zona de cisalhamento de Namama e as zonas de falhamentos que Ueda et al., (2012) designou por Corredores Gurué-Cuamba e Chilwa-Mavago. (Stern, 1994); citados por (Viola et al., 2008).

À Norte do Cinturão de Lúrio encontra-se o bloco de Namuno (Grantham et al., 2013), que consiste em gnaisses Mesoproterozóicos. Estes gnaisses são intercalados por rochas metamórficas de alto grau e de carácter Máfico.

À Sul do Cinturão de Lúrio encontra-se o Complexo Mesoproterozóico de Nampula, que é dominado de ortognaisses e rochas meta-sedimentares de alto grau metamórfico. As rochas Mesoproterozóicas deste Complexo são recobertas por granulitos alóctones Neoproterozóicos (Klippen de Monapo e de Mugeba), e por rochas metassedimentares Neoproterozóicas dos grupos de Mecuburi e de Alto

Benfica (Macey et al., 2013), (Figura 6). A tabela 3 resume os complexos geológicos, suas idades, e respectivas unidades litológicas dominantes regionalmente na área de estudo.

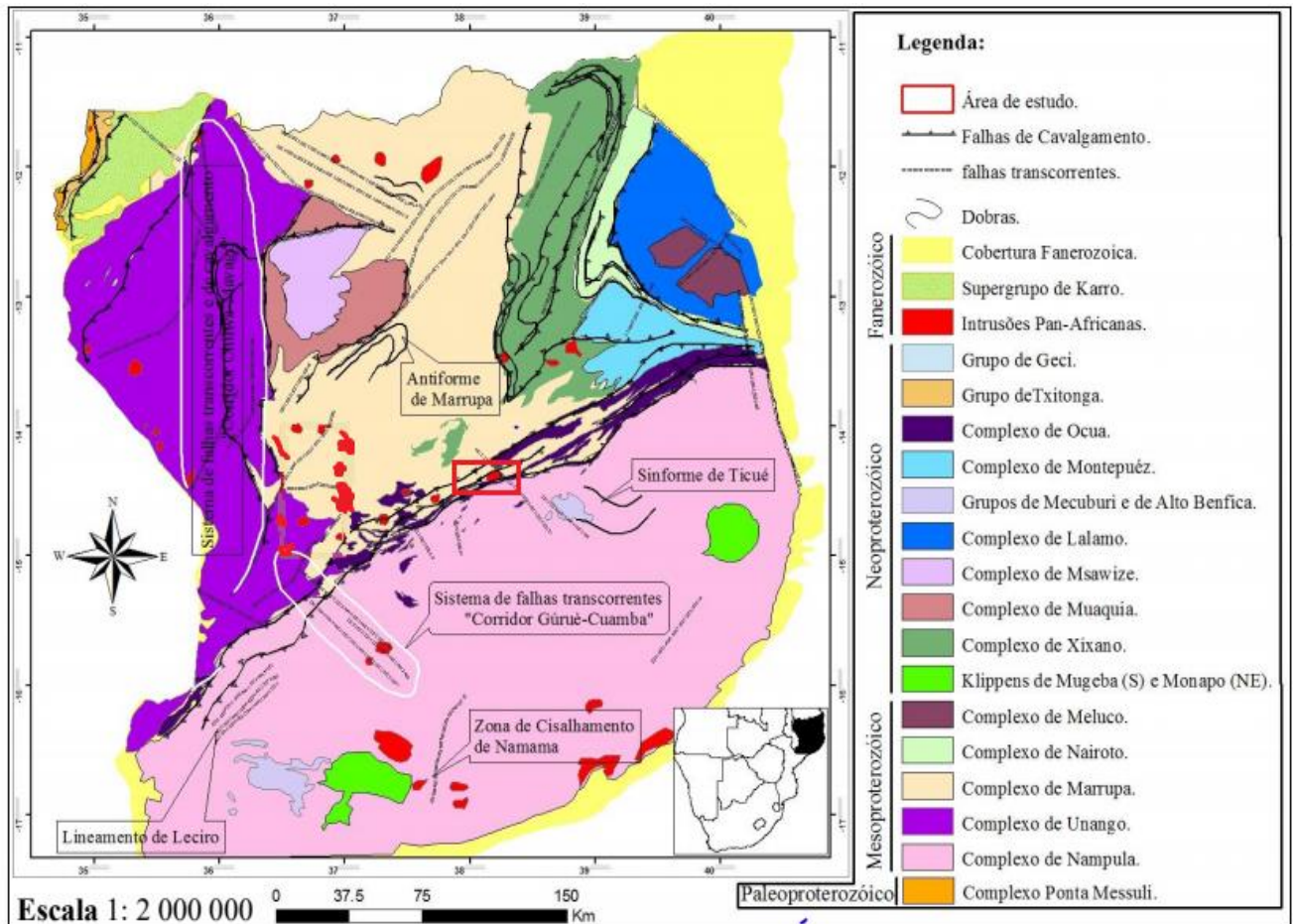


Figura 6: Mapa Geológico-Estrutural de Nordeste de Moçambique, modificado de (Ueda et al., 2012).

Tabela 3: Tabela descritiva dos complexos geológicos, suas idades e respectivas unidades litológicas dominantes regionalmente na área de estudo.

ERA	Período	Complexos geológico	Unidades geológicas
PROTERZOICO	Neoproterozóico	Complexo de Ocua	Malange tectónica dominada essencialmente de litologias granulíticas.
		Grupo de Mecuburi	Bacias sedimentares dominadas de meta-conglomerados, meta arenitos,

		Grupo de Txitonga	meta-arcose e gnaisses biotíticos.	
		Grupo de Alto Benfica		
		Klippen de Monapo e de Mugeba	Gnaisses granulíticos máficos ultramáficos, gnaisses tonalítico e rochas carbonáticas.	
		Complexo de Montepuez	Ortognaisses (gnaisses graníticos e anfibolíticos), e paragnaisses (quartzito, meta-arcose, gnaisses quartzo feldspato, gnaisses biotítico e mármore).	
		Complexo de Lalamo	Gnaisses graníticos, tonalíticos anfibolítico, paragnaisses granulíticos máficos.	
		Complexo de Msawize		
		Complexo de Muaquia		
		Complexo de Xixano		
		Mesoproterozóico	Complexo de Meluco	Gnaisses graníticos, dioríticos, tonalíticos, anfibolíticos, paragnaisses e granulitos máficos.
			Complexo de Nairoto	
Complexo de Marrupa				
Complexo de Unango				
Complexo de Nampula	Gnaisses biotíticos, tonalíticos anfibolíticos; gnaisses quartzo feldspatos, quartzitos, Charnokitos e mármares.			

4.2. Geologia Local

A área de estudo insere-se nos Complexos Mesoproterozóicos de Nampula, Marrupa, e no Complexo Neoproterozóico de Ocua.

O **Complexo de Nampula** é constituído por rochas de idade Mesoproterozóica, essencialmente ortognaisses intrusivos de composição granítica e rochas supracrustais. Este complexo foi afectado por uma intensa actividade tectónica ocorrida durante o Pan-Africano, manifestada através da obdução de nappes, representados pelos klippens de monapo e mugeba (Norconsult Consortium, 2007).

O **Complexo de Marrupa** é constituído por gnaisses granodioríticos, migmatitos bandados com foliação tectónica, rochas de composição calco-alcalina, representadas por tonalitos, trondjemitos e grano-monzonitos que constituem o núcleo de antiformes (Norconsult Consortium, 2007).

Ocorrem também no complexo de Marrupa, embora pouco pronunciados, pequenos níveis de Mármore associados a gnaisses quartzo-feldspáticos e hornblêndicos, em parte migmatíticos. Inclui-se também neste lote, a ocorrência de rochas de composição granítgabróica sob forma de diques instalados ao longo de fracturas de orientação NE-SW e NW-SE, cortando a orientação preferencial da maioria das unidades supracrustais.

O **Complexo de Ocua** é considerado um pacote de unidades litológicas oriundas de diferentes fontes, este complexo é composto por rochas que foram fortemente deformadas e que sofreram metamorfismo de fácies anfibolíticas a granulíticas, compreendendo principalmente gnaisses granulíticos máficos a félsicos, ortognaisses de composição granítica a anfibolítica e paragnaisses de idade Neoproterozóica (Norconsult Consortium, 2007), que foram intruídas por granitóides da Suíte de Malema (Viola et al., 2008).

Na área de estudo, para além das rochas do complexo de Nampula, Marrupa e Ocua, ocorrem também intrusões graníticas que podem ser das suítes de Murrupula, Malema ou Niassa (figura 7).

4.3. Geologia Económica e Mineração da Área de Estudo

Os recursos minerais da área de estudo catalogados na Carta de Jazigos e ocorrências minerais, na escala de 1:1 000 000 incluem ocorrências de Au, Cu, Ag, Fe, terras raras (Ce e Y), grafite e pequenos jazigos de turmalina e moscovite (Marques, 2000).

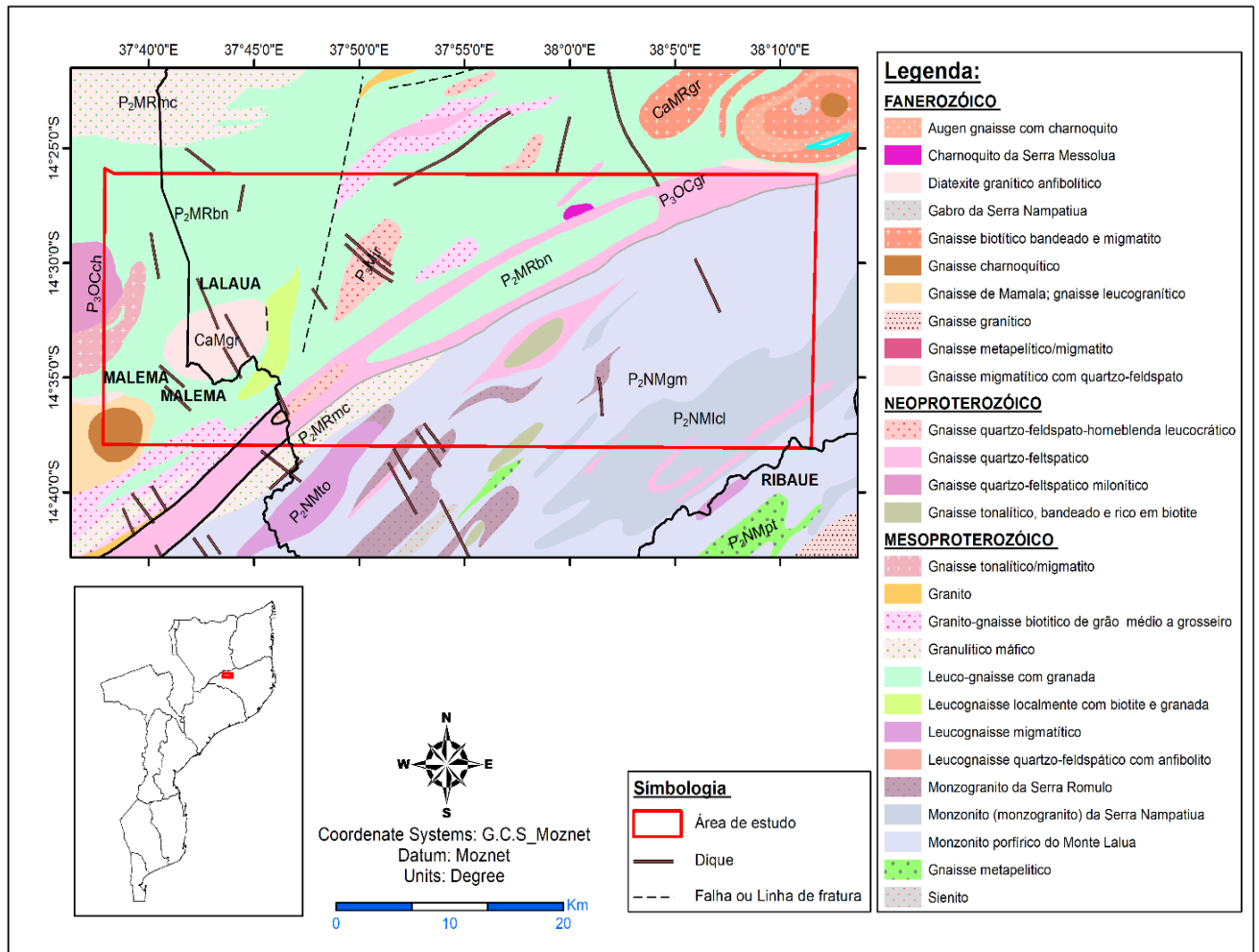


Figura 7: Mapa de geologia da área de estudo (fonte: dados de Cenacarta).

De acordo com a Norconsult Consortium, 2007, há ocorrências de Cu, Ni e Co e estão associadas aos veios de sulfuretos (pirrotite e calcopirite). Estudos realizados por (Korkiakoski, 2008) identificaram ocorrências de Au na área de estudo e parecem estar associadas aos granulitos máficos do Complexo de Ocua.

As associações de Ag-Cd, Cu-Ni e Zn-Co obtidas na análise de agrupamentos feita em sedimentos de corrente da área de estudo foram atribuídas a rochas ultramáficas, a sulfuretos hidrotermais e aos anfibolitos (Cossa, 2008).

As mineralizações na região de Namuno foram condicionadas pelas unidades litológicas e pelos eventos tectônicos que ocorreram na região.

Na zona S do Namuno, são observadas aluviões e eluviões enriquecidos por mineralizações de ouro (Au), cobrindo uma área de 300 km² (Lächelt, 2004).

Acompanhado ao Au, encontra-se o mineral talco-clorítico em xistos e ocasionalmente actinolite em paragênese com biotite em nas zonas de contacto com granitos (A. Soares de Andrade, 1995).

Em zonas de contacto entre granitos e calcários, ocorrem mineralizações associados aos depósitos tipo skarn. Estes se encontram enriquecidos por cassiterites e scheelites (Lächelt & Daudi, 1999).

Na zona de Mazeze, em Namuno, ocorrem vestígios de grafites associados aos xistos grafitosos e biotites associados aos granulitos gnaisses anfibolíticos (Lächelt & Daudi, 1999), citado por (Lächelt, 2004).

A geologia da área em estudo reserva um atraente potencial económico em termos de mineralizações de granada, água-marinha e ocorrências de pedra para construção civil. No que diz respeito a mineralizações de granada, importa referir que um depósito de granadas no distrito de Cuamba já foi estudado com detalhe. Tais estudos permitiram uma exploração comercial durante a segunda metade do século XX (Norconsult Consortium, 2007).

Estudos detalhados levados a cabo nas áreas de ocorrência de Namecova, Nametimbua e Mpacura indicam que esta mineralização se hospeda em gnaiss biotítico (Kadiembwe, 1992). Segundo a Norconsult Consortium, 2007 esta não é a única ocorrência de granada na folha 1436, como também são conhecidas outras ocorrências de granada associada à gnaisses quartzo-feldspáticos do Complexo de Marrupa.

A Norconsult Consortium, 2007, também reporta outras ocorrências de granadas em aluviões que ocorrem ao longo dos principais rios que atravessam as formações metamórficas que hospedam esta mineralização. A ocorrência de mineralizações de água-marinha é conhecida mais para a parte Sul da área em estudo, onde ocorrem em filões pegmatíticos graníticos que segundo (Kadiembwe, 1992) assumem uma orientação N50.

5. CAPÍTULO V: MATERIAIS E METODOLOGIA

5.1. Materiais e Softwares

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ Imagem ASTER L1T (Orto-retificada) no formato HDF, adquirida no dia 9 de novembro de 2005, pelas 13 horas e 27 minutos. A data e a hora de aquisição correspondem às melhores condições ambientais (mínima nebulosidade), assegurando a qualidade espectral.
- ✓ Imagem ASTER GDEM V3, adquirida no dia 27 de Agosto de 2020, pelas 14 horas e 41 minutos. Utilizado para a análise topográfica, extração de padrões de drenagem e modelos 3D.
- ✓ Imagem SRTM (DEM) V3, adquirida do dia 13 de Outubro de 2014, pelas 13 horas e 50 minutos. Essencial para a extração de lineamentos. Sendo um dado de radar, tem melhor capacidade de penetração em vegetação do que o ASTER (óptico).
- ✓ Mapa geológico de Moçambique, na escala 1:1000 000, obtida por meio na DNGM; Mapas geológicos da porção NE da Província de Nampula, na escala 1: 250 000, que correspondem as Folhas 1437 e 1438 do GTK CONSORTIUM, 2006. Estes mapas foram utilizados como referência litológica primária para a validação conceitual do mapeamento.
- ✓ *Shapefiles* do mapa geológico de Moçambique e do mapa da divisão provincial e administrativa da Província de Nampula (obtidos por meio da Cenacarta): usados para delimitar as fronteiras administrativas e garantir o enquadramento geográfico adequado.
- ✓ Carta de ocorrências minerais na escala 1:1000 000, obtida por meio na DNGM: Utilizada para contextualizar o potencial económico da área. Foi fundamental para estabelecer a ligação entre as estruturas mapeadas (falhas e cisalhamentos) e os alvos de prospecção mineral esperados (Skarn, W, Sn).

Dos softwares usados incluem:

- ✓ **ArcGIS 10.8**: usado para criar *Shapefiles* e gerar o mapa resultante da interpretação das imagens processadas;
- ✓ **ENVI 5.3**: usado para o tratamento inicial e processamento da imagem ASTER;
- ✓ **RockWorks 17**: usado para gerar diagrama de rosetas dos lineamentos.

5.2. Metodologia

5.2.1. Revisão Bibliográfica

Esta fase consistiu na extração de maior quantidade possível de informações de carácter científico que revelam os estudos feitos na região. Esse conjunto de informações foi consultado em notícias explicativas de cartas geológicas, projectos e artigos científicos relacionados, dissertações, e em relatórios de actividades de consultoria. De todo o acervo bibliográfico consultado merecem realce as notícias explicativas na escala 1: 250 000 do Consórcio Finlandês (GTK CONSORTIUM, 2006) e na escala 1:1000 000 de (G. Grantham et al., 2011), dissertações de (Zou & Zou, 2013) e (Kujjo, 2010) e publicações de (Sabins, 1999) e (Aboelkhair et al., 2010) referentes à aplicação da teledetecção no mapeamento litológico e mineral. As consultas foram realizadas nas bibliotecas do Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane, Direcção Nacional de Geologia (DNG) e digitais.

5.2.2. Aquisição de Dados

Nesta fase fez-se a aquisição das imagens ASTER, ASTER GDEM e SRTM, que posteriormente foram processadas para extração de informações litológicas e estruturais. É de salientar que estas imagens foram baixadas de forma gratuita, através do site oficial da USGS (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), e georreferenciadas para o Sistema de Coordenadas UTM, WGS 1984 (DATUM), ZONA 37S e Sistema de Coordenadas Geográficas Moznet.

5.2.3. Pré-Processamento

Antes da análise e extração de informação na imagem ASTER, a mesma foi submetida ao tratamento inicial, que consistiu na aplicação de técnicas correcção radiométrica e remoção dos afeitos atmosféricos na imagem. O objectivo principal da aplicação destas técnicas é de melhorar a qualidade visual dos dados contidos na imagem, tornando a análise e a interpretação dos dados ainda mais precisas.

a) Reamostragem das Bandas

Fez-se a reamostragem das bandas na imagem ASTER, no software **ENVI 5.3**. As bandas SWIR com resolução espacial de 30 metros foram reamostradas para que tenham uma resolução espacial de 15 metros, de modo que se igualem às bandas do VNIR, como forma de preservar o detalhamento das bandas de melhor resolução e garantindo assim, o uso simultâneo das bandas (Venturieri, 2007). As bandas do TIR foram mantidas com 90 m de resolução espacial porque nas regiões termais usou-se um método de correção atmosférica diferente das outras bandas.

b) Correção Radiométrica

Esta etapa visa converter os dados brutos do sensor em valores físicos e uniformes:

Conversão DN para Radiância: Os Digital Numbers (DN) das bandas VNIR, SWIR e TIR foram convertidos para Radiância (unidades de energia física) utilizando os coeficientes de calibração fornecidos nos metadados do HDF do ASTER.

Correção de Ruído (Destriping): As bandas afetadas pelo stripping (erro de detetor) foram corrigidas no ENVI 5.3 através da ferramenta *Radiometric Calibration*, restaurando a uniformidade visual e estatística da imagem.

c) Correções Atmosféricas

A atmosfera interage com a radiação electromagnética, interferindo na identificação dos alvos terrestres captados pelas imagens de sensores remotos. A radiância medida pelo sensor difere da radiância real do material, devido ao efeito aditivo do espalhamento dos raios causados pelos aerossóis, gases e moléculas de água da atmosfera (Meneses & Almeida, 2012). Como consequências, há alteração na faixa de valores digitais registrados pelo sensor, alteração do brilho de cada ponto da imagem e diminuição do contraste entre superfícies próximas. A correção de efeitos atmosféricos, foi feita de modo a minimizar a influência da atmosfera sobre a radiação reflectida pelo alvo e captada pelo sensor (Vicente, 2007).

Torna-se óbvio que para uma interpretação confiável das imagens de satélite é necessário remover os efeitos que a atmosfera introduz, garantindo assim, a qualidade da mesma. Para proceder às

correções atmosféricas da imagem ASTER, foram usadas as ferramentas “*FLAASH Atmospheric Correction*” (para as bandas do VNIR e SWIR) e “*Thermal Atmospheric Correction*” para as regiões térmicas, no software ENVI 5.3.

❖ *FLAASH Atmospheric Correction*

Este método foi aplicado para remover o ruído atmosférico (aerossóis e vapor de água), convertendo a Radiância em Reflectância à Superfície. Esta é uma etapa crucial para isolar a assinatura espectral pura da rocha para a análise litológica quantitativa.

Para poder suprimir os efeitos atmosféricos usando este método, foi necessária a utilização de parâmetros que nos forneçam dados reais das condições atmosféricas no dia em que a imagem ASTER foi obtida. Esses parâmetros correspondem à: Data/Hora da Aquisição da Imagem, Altitude do Sensor, Elevação do Solo, Coordenadas Geográficas (*Scene Center*), Quantidade de CO₂ na Atmosfera, Aerossóis, etc (De Paula et al., 2012).

Para ter acesso à estas informações, criou-se um arquivo em formato *text file* (txt), a partir da ferramenta “*View Hdf Global Attributes*” no ENVI 5.3. Este arquivo contém metadados da imagem ASTER original. Possibilitando assim, a extração destes parâmetros e posterior correção dos efeitos atmosféricos para as bandas VNIR e SWIR. Os dados finais desta correção, são transformados/convertidos em reflectância.

❖ *Thermal Atmospheric Correction*

Esta ferramenta usou-se para a remover as contribuições atmosféricas dos dados de radiância para as regiões térmicas. Os dados da imagem térmica devem ser convertidos em radiância antes de executar a correção atmosférica. Os dados finais desta correção, são transformados/convertidos em emissividade.

d) ROI (*Region Of Interest*).

Recortou-se a área de interesse através da ferramenta ROI (*Region Of Interest*). Assim, devidamente corrigida a imagem estaria pronta para ser submetida a processamentos digitais posteriores e/ou análise visual.

5.2.4. Processamento Digital de Imagens

Esta etapa teve como objectivo principal realizar operações nas bandas espectrais, para facilitar a identificação e a extracção das informações contidas nas imagens para posterior interpretação. Para a interpretação litológica no presente projecto foram usadas as operações: Razão entre bandas, composição ou combinação colorida de bandas nas imagens ASTER para melhor distinção e identificação das rochas presentes na área de estudo. Para a interpretação estrutural foi feita a combinação de bandas em imagens ASTER, assim como a técnica de relevo sombreado em imagens SRTM. As imagens ASTER GDEM foram submetidas aos processamentos elementares no software ArcGIS versão 10.8 para a geração de mapas de altitudes e extracção da rede de drenagem.

5.2.5. Índice de Vegetação (NDVI)

A cobertura vegetal constitui uma barreira na aplicação da teledeteccção para o mapeamento litológico, uma vez que oculta a informação geológica presente no terreno. Daí que, foi calculada o índice de vegetação (NDVI), para perceber a densidade e distribuição espacial da vegetação na área de estudo (Zou & Zou, 2013). O Índice de Vegetação Diferencial (NDVI) foi calculado através da fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{Banda3} - \text{Banda2}) / (\text{Banda3} + \text{Banda2}).$$

5.2.6. Máscara da Vegetação

Foi criada uma máscara de vegetação a partir da imagem NDVI, para eliminar os pixéis dominados pela vegetação e as sombras de relevo. Foi usado um limiar (*threshold*) de 0.052, pois separava de forma mais eficaz as áreas vegetadas do resto da imagem.

5.2.7. Mapeamento Litológico

O mapeamento das litologias aflorantes na área de estudo foi substanciado pelo uso de diversas técnicas de processamento a destacar: Razões de bandas, composições coloridas e índices de minerais. Essas técnicas são discutidas exaustivamente nas secções a seguir.

5.2.8. Razões de Bandas

A razão de bandas é um processo pelo qual os valores do brilho do pixel em uma banda são divididos pelos valores do brilho do pixel correspondente em outra banda de forma a criar uma nova imagem na saída do processo. Estas razões podem realçar ou atenuar certos atributos (bruma, topografia, etc) encontrados numa imagem, dependendo das características espectrais de cada uma das bandas escolhidas, caracterizando determinadas feições da curva de assinatura espectral de alguns alvos (Santos, 2005).

Diferentes razões de bandas, pertencentes à região termal na maioria das vezes, foram calculadas para distinguir as rochas aflorantes (tabela 4).

5.2.9. Índices de Minerais

Índice de Mineral é uma técnica de melhoramento de imagem que tem por finalidade, evidenciar a ocupação espacial de um determinado mineral em uma imagem. Diversos índices de minerais foram definidos para quartzo, carbonatos e minerais máficos para bandas do TIR, de modo a mapear rochas (Aboelkhair et al., 2010).

As razões de bandas acima referenciadas, foram concebidas como índices de minerais conforme mostra a tabela 4.

***Tabela 4:** Índices de minerais usados no mapeamento litológico, realçados através das razões calculadas a partir das bandas termais do sensor ASTER e as respectivas feições.*

Índice de Minerais	Razão de Banda	Feições Realçadas
Índice de Sílica	13/12	Rochas ricas em Sílica
Índice de Minerais Máficos	12/13	Rochas pobres em Sílica
Índice dos Carbonatos	13/14	Rochas ricas em carbonatos
Índice de Óxidos de Ferro	2/1	Óxidos de Ferro

5.2.10. Composições Coloridas

Foi criada a imagem de composição colorida 732, para perceber a distribuição espacial da vegetação na área de estudo. Por outro lado, foram ainda criadas as imagens de composição colorida das razões (12/13, 11/12, 13/12) como forma de analisar a distribuição espacial dos Litótipos correspondentes.

5.2.11. Mapeamento Estrutural

O mapeamento estrutural da área de estudo consistiu basicamente na composição colorida das bandas 751 e 742 do sensor ASTER (para a identificação das falhas, dobras, foliações, diques, zonas de cisalhamento, etc). Para a identificação de lineamentos, foi feito o processamento dos DEMs disponibilizados pelo sensor SRTM. Os DEMs SRTM apresentam uma resolução espacial de 90 m. Estes dados foram previamente projectados no sistema de coordenadas UTM e WGS 84. Foram criadas imagens de relevo sombreado, a partir dos dados acima referenciados, utilizando ângulos de inclinação do sol 45, 50 e 60 graus de sobre o horizonte e três ângulos de declinação azimutes 315, 200, 100 graus, permitindo assim a extracção de lineamentos. Tal como no mapeamento litológico, as estruturas foram manualmente extraídas no ArcGis versão 10.8.

5.2.12. Integração dos Dados

As litologias e as estruturas extraídas separadamente em seus respectivos mapas, confrontados com os mapeados previamente na carta 1:250000 do GTK CONSORTIUM, 2006 e outros dados referenciados anteriormente, foram integrados com auxílio da ferramenta *ArcMap*. Este exercício culminou com a elaboração da carta geológica interpretativa final correspondente à área de interesse. A figura 8 apresenta um resumo detalhado da metodologia usada no presente trabalho.

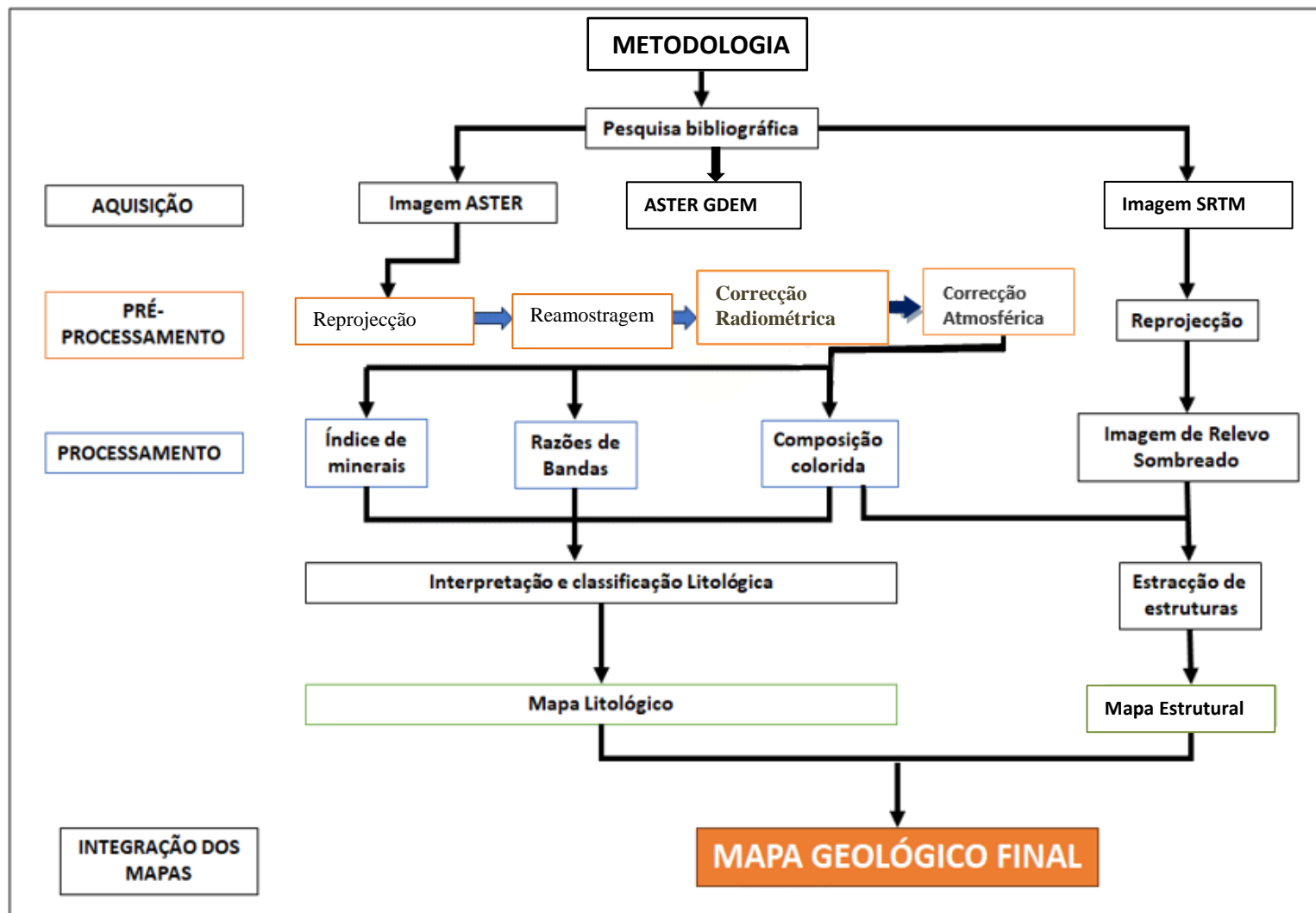


Figura 8: Fluxograma metodológico levado à cabo para o presente projecto

6. CAPÍTULO VI: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

6.1. Cobertura Vegetal

Os resultados do cálculo do NDVI estão ilustrados na figura 10A. A imagem NDVI de saída tem um intervalo de valores de -0,22 a 0,45. As áreas com um valor de NDVI acima de 0 são atribuídas à uma faixa de cor verde, que são áreas com vegetação densa. As áreas com um valor de NDVI abaixo de 0 são atribuídas à uma faixa de cor violeta, que correspondem às áreas menos vegetadas (figura 9A).

A análise da imagem NDVI foi feita através da comparação com a imagem de composição colorida 732, na mesma área, visto que a vegetação apresenta alta reflectância na banda 7 do sensor ASTER, através desta imagem. Constata-se que a vegetação densa é identificada nas zonas de altitudes elevadas (montes) à sudeste, nas margens dos principais rios, e ao longo de lineamentos e fraturas geológicas que ocorrem na área de estudo (figura 9B).

De acordo com a análise acima, pode-se concluir que a área de estudo é pouco vegetada, a vegetação não é tão impactante ao ponto de interferir nos resultados. Excepto ao longo das áreas anteriormente referenciadas, pelo que a vegetação pode ser ignorada nestas áreas.

Após uma comparação da imagem NDVI com a imagem de composição colorida 732 do sensor ASTER, foi criada uma máscara de vegetação com um limiar (*threshold*) de 0.052, que foi escolhido porque separava de forma mais eficaz estas áreas vegetadas do resto da imagem. A máscara foi utilizada para eliminar os pixels dominados pela vegetação e pela sombra de relevo, de modo a não influenciarem nos resultados subsequentes (anexos 7 e 8).

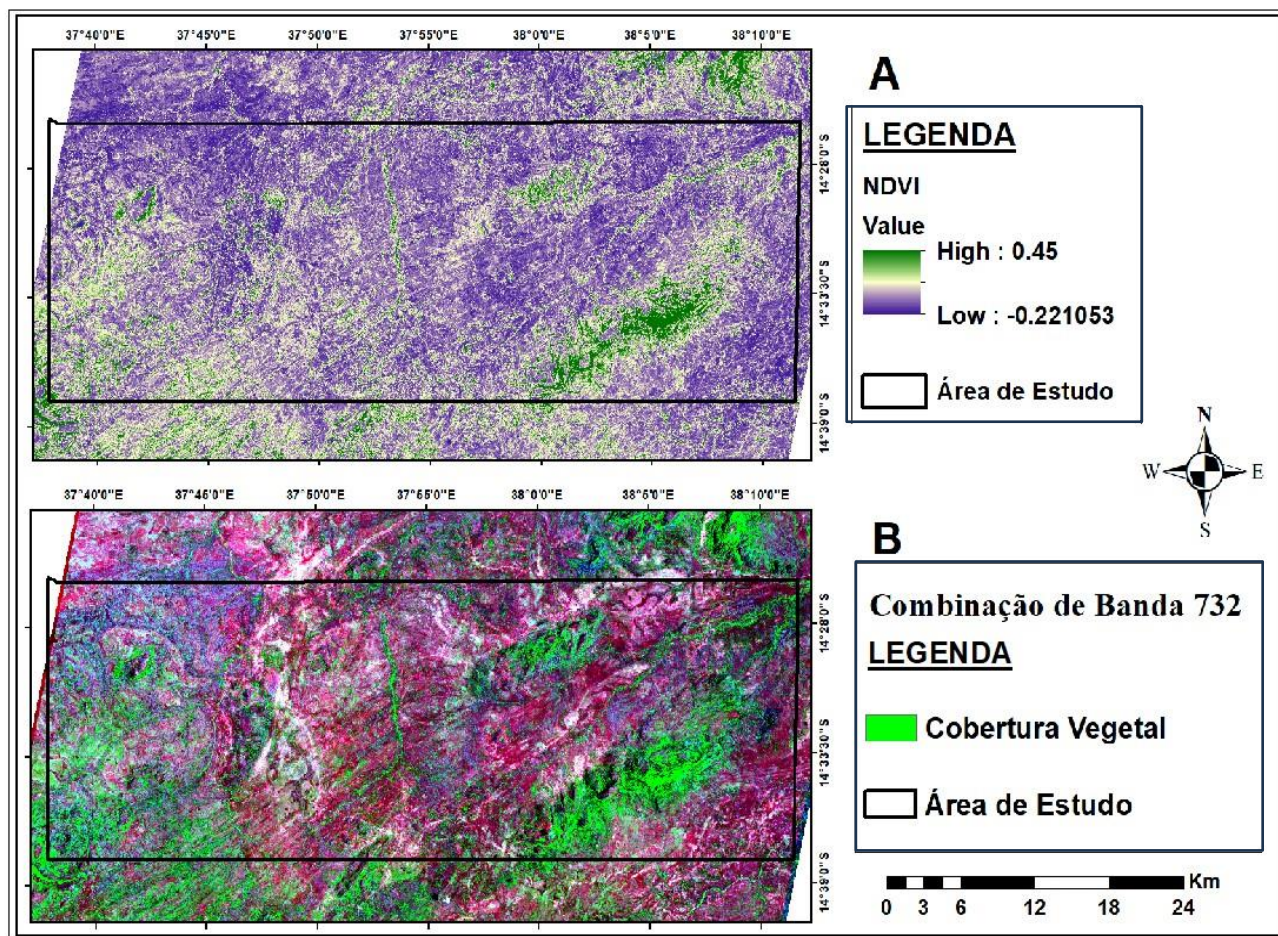


Figura 9. (A): Imagem NDVI da área de estudo. A imagem tem um intervalo de valores de -0,22 a 0,45. As áreas com um valor de NDVI acima de 0 são atribuídas à uma faixa de cor verde que são áreas com vegetação densa. As áreas com um valor de NDVI abaixo de 0 são atribuídas a uma faixa de cor violeta que correspondem às áreas menos vegetadas ou sem vegetação activa. (B): Cobertura vegetal na área de estudo. As zonas vegetadas são caracterizadas pela cor verde e concentram-se nas zonas de grande altitude à sudeste, nas margens dos principais rios e ao longo de fraturas geológicas.

6.2. Mapeamento Litológico

O mapeamento litológico consistiu na aplicação de três técnicas de processamento de imagens ASTER: Índice de Minerais, Razão de Bandas e Combinação de Bandas. Com base nos índices de minerais, obtidos através de operações matemáticas aplicadas às bandas do TIR, foi possível mapear as áreas abrangidas pelas litologias relacionadas com a ocorrência de minerais ricos em sílica e máficos. Foram usados dois índices de minerais para a identificação de litologias. Trata-se do índice de sílica e índice máficos.

6.2.1. Índice de Sílica (IS)

As rochas ricas em sílica mostram baixa emissividade na banda 12 do sensor ASTER e uma alta emissividade na banda 13. O índice de sílica obtém-se, portanto, dividindo a banda 13 pela banda 12. Rochas com elevada percentagem em sílica apresentam valores digitais mais elevados em detrimento das rochas menos silicatadas. As áreas com tonalidade esbranquiçada na segunda imagem da figura 10A, estão relacionadas à ocorrência de rochas félsicas ou com maior percentagem de sílica. Pode se observar menor predominância destas unidades ao longo da área de estudo, podendo ocorrer somente em algumas litologias com orientações NE-SW e N-S da mesma. Na figura 11, é possível notar que as rochas ricas em minerais félsicos aparecem com tonalidades azuladas. Ademais, as litologias representam os membros máficos e intermédios da área de estudo. Isto resulta da razão de banda 13/12.

6.2.2. Índice de Máficos (IM)

O índice de máficos é obtido através da razão entre as bandas 12 e 13. Contrariamente ao índice de sílica, a área de estudo apresenta um relativo enriquecimento em minerais máficos em comparação com sílica, destacadas através de tons esbranquiçados visto na imagem da figura 10B, o que sugere que a área é maioritariamente constituída por unidades litológicas enriquecidas em minerais máficos.

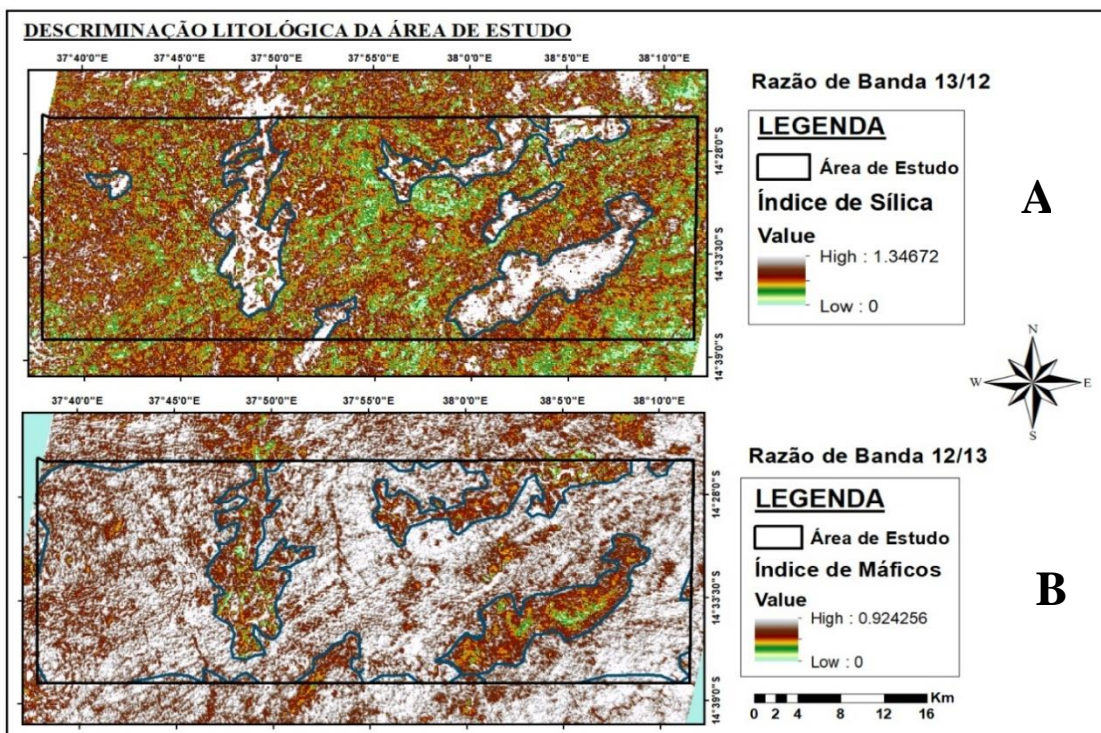


Figura 10: Imagem de unidades litológicas enriquecidas em: (A) sílica e (B) máficos, respectivamente.

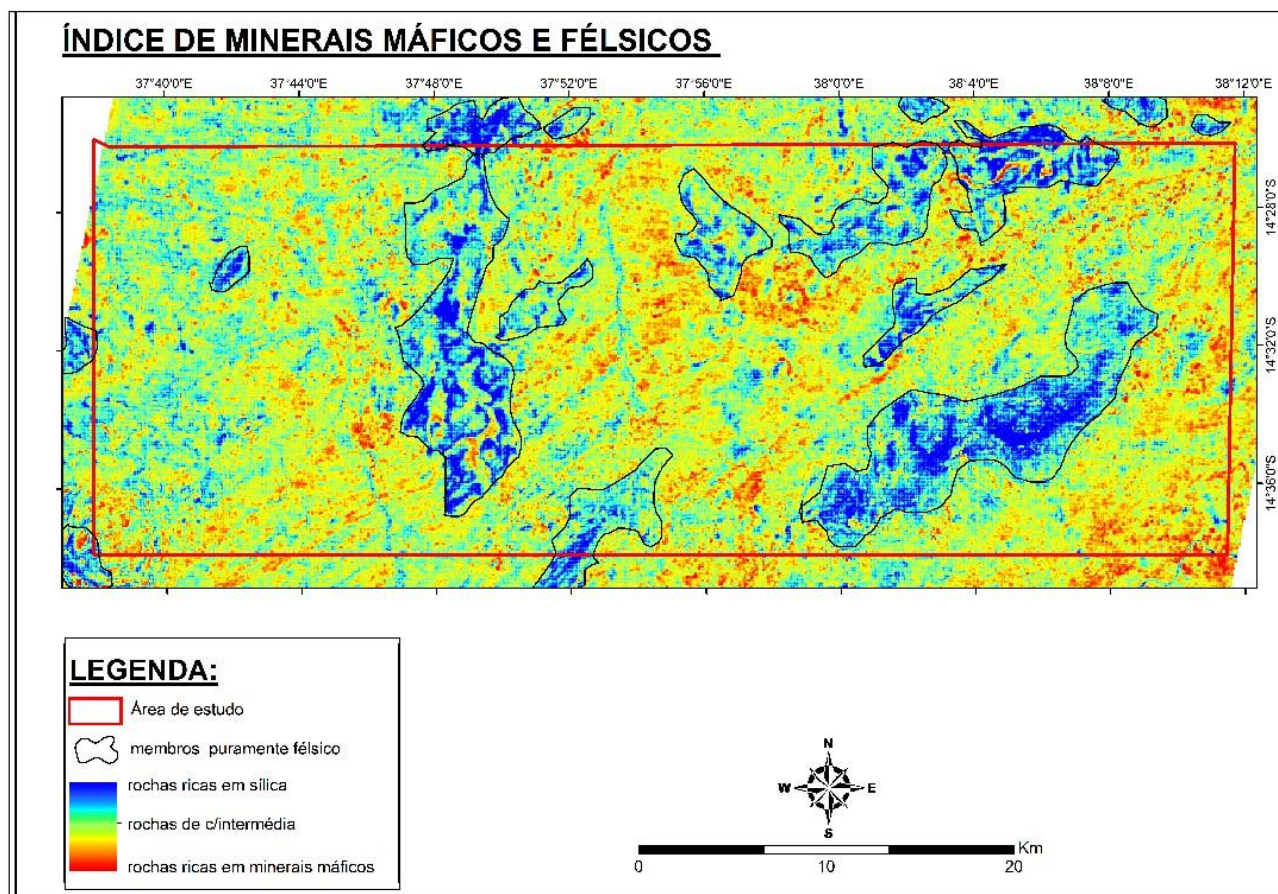


Figura 11: Imagem mostrando unidades litológicas enriquecidas em Sílica, máficos e composição intermédia.

6.2.3. Composição de Bandas de Minerais Félsicos e Máficos

A imagem obtida através de combinação de razões de bandas 12/13, 11/12, 13/12 permite observar que as rochas mais ricas em minerais félsicos estão destacadas pelos tons verdes, na qual estão distribuídos em unidades litológicas em corpos isolados com diferentes orientações sendo a menor litologia predominante. Os pixéis com tonalidades lilás representam litologias ricas em minerais máficos que perfazem a maior representação ao longo da área de estudo. Como pode se observar na figura 12.

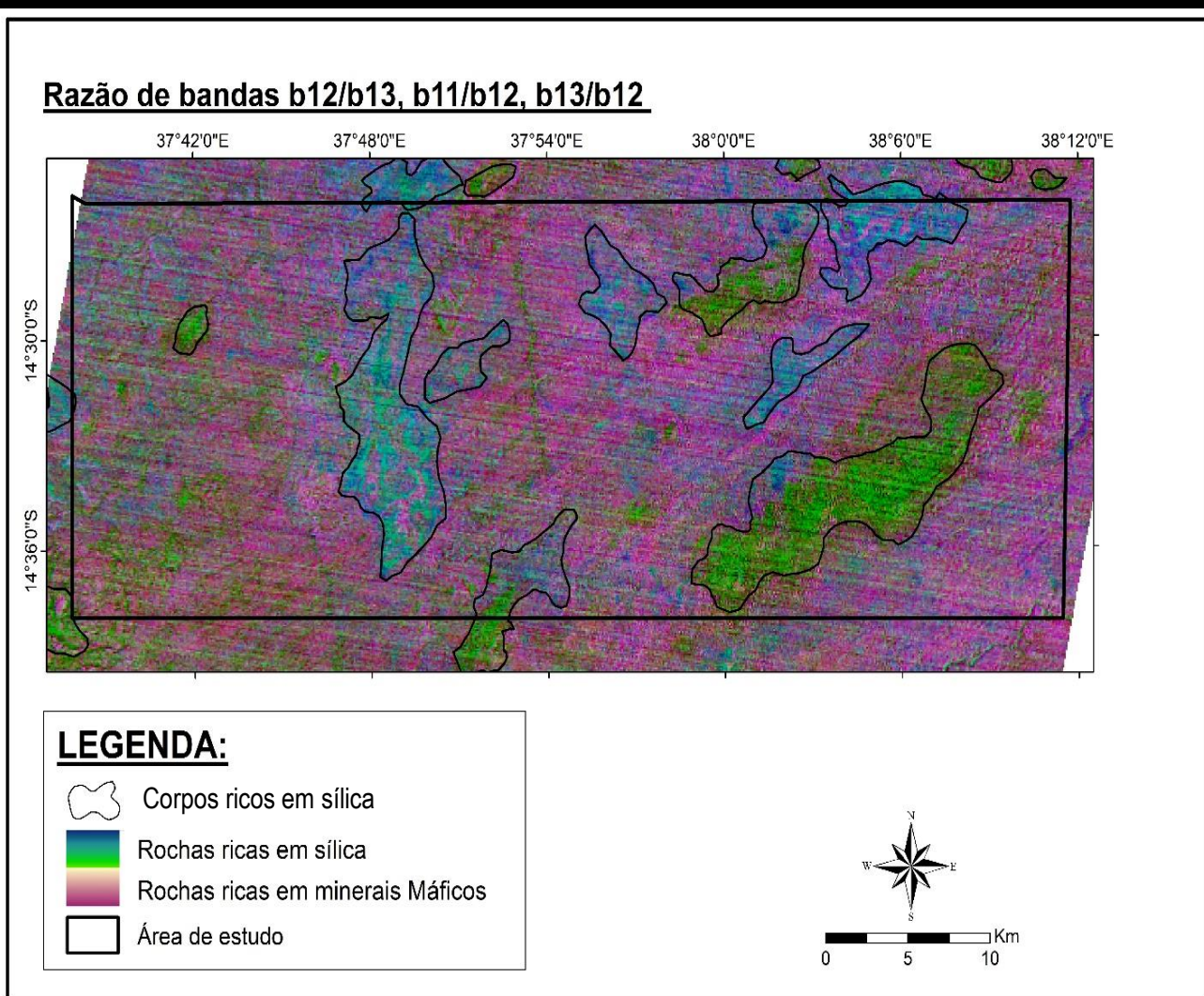


Figura 12: *Combinação de razão de bandas 12/13, 11/12 e 13/12, destacando as rochas ricas em minerais félsicos, Máficos.*

6.2.4. Índice de Carbonatos (IC)

Os carbonatos apresentam alta emissividade na banda 13 e baixa na banda 14. Na área de estudo, as zonas ricas desses minerais são caracterizadas por tonalidades azuis, conforme a figura 13. Fazendo uma relação entre os carbonatos e rochas máficas acima discriminadas. Nota-se que os minerais constituintes das rochas máficas mapeados estão espacialmente associados aos carbonatos.

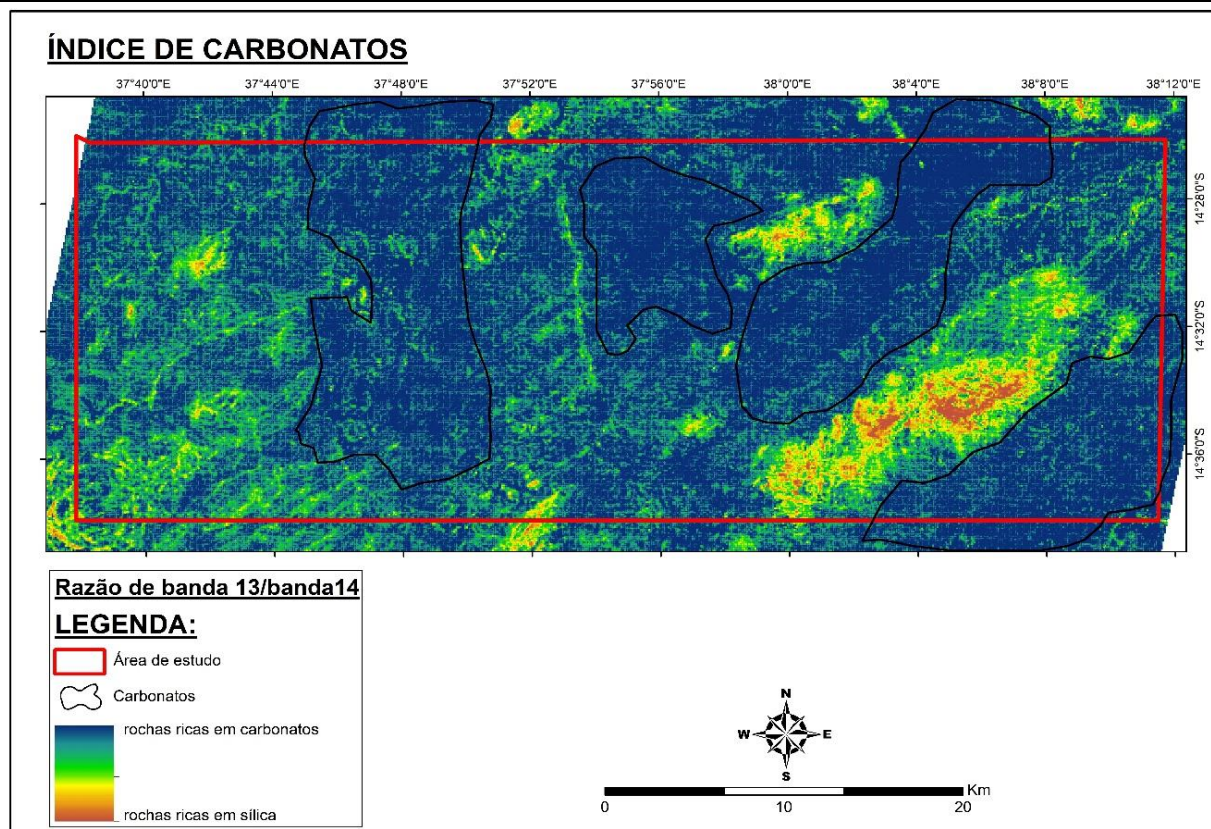


Figura 13: Imagem de razão de banda 13/14 do Sensor ASTER exibindo zonas ricas em carbonatos através de polígonos azuis.

6.2.5. Índice de Óxidos de Ferro

O mapeamento de óxidos de ferro tem sido amplamente desenvolvido na pesquisa de Gossans que são fortes indicadores de diversas mineralizações tais como as de metais básicos (Cu-Zn-Au-Pb), de cobre porfirítico e, como suplemento na discriminação de rochas (Cavalcante, et al., 2010). As rochas máficas, por exemplo, são constituídas significativamente por minerais da classe dos óxidos e hidróxidos de ferro. A distinção dessas rochas pode ser reforçada pelas assinaturas espectrais desses minerais na área de estudo.

Os óxidos de ferro apresentam maior reflectância na banda 2 e baixa na banda 1. Os tons dos pixéis avermelhados caracterizam a presença de unidades litológicas enriquecidas em ferro. Desta maneira, na área de estudo os óxidos de ferro predominam ao longo de toda área, como pode se observar na figura 14.

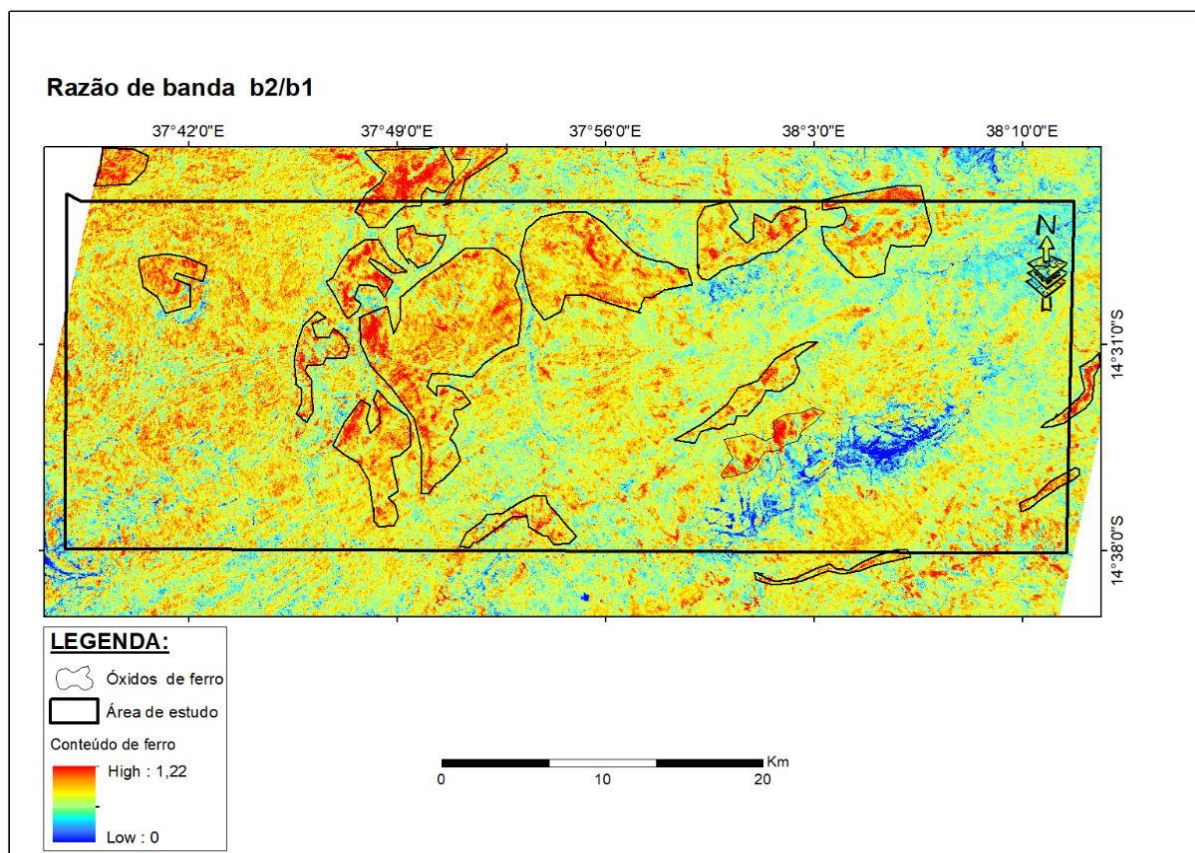


Figura 14: Imagem de razão de banda 2/1 do Sensor ASTER, mostrando distribuição dos óxidos de ferro.

6.2.6. Unidades Mapeadas

A aplicação de técnicas de processamento multiespectral em imagens ASTER (permitiu distinguir e mapear novas unidades litológicas que não estavam discriminadas no mapeamento geológico de 1:250.000 do GTK CONSORTIUM 2006.

Estas novas unidades são:

Corpos Félsicos: Mapeados através da sua alta assinatura de Emissividade TIR (alto teor de sílica), estes corpos encontram-se instalados em zonas estruturais chave. Estão distribuídos na parte Sudoeste (nos Monzonitos da Serra Nampatiua e Monte Lalaua), na zona Nordeste (instalados nos Complexos Marrupa e Ocua) e no Monte Miruei (zona central).

Depósitos Aluvionares: Unidades Quaternárias mapeadas nas margens e zonas de deposição dos principais rios (zonas Central, Norte e Nordeste), sobrepondo as litologias Marrupa e Ocua. O restante das unidades litológicas de rochas cristalinas foram confirmadas e os seus limites refinados pelo presente mapeamento, mantendo o enquadramento litológico geral da Carta GTK (Figura 7).

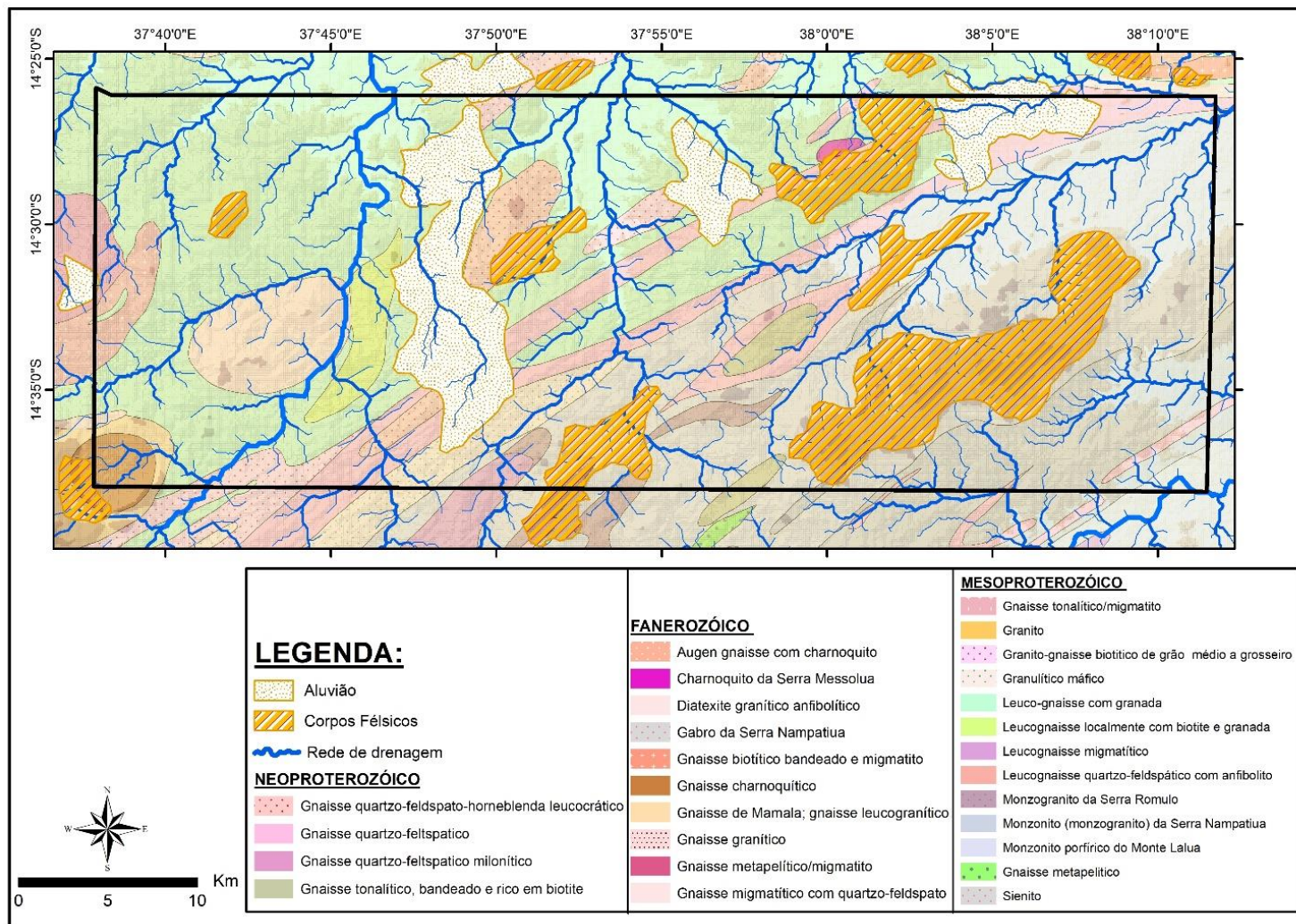


Figura 15: Mapa litológico interpretativo obtido através do processamento digital de imagens ASTER.

6.3. Mapeamento Estrutural

Para facilitar e perceber a evolução estrutural da área de estudo, foram mapeadas tanto estruturas presentes na área de estudo como as que figuram nas áreas vizinhas. O mapeamento estrutural abrangente deve-se à geologia estrutural muito complexa que caracteriza a área de interesse. Os resultados a seguir apresentados estão agrupados em deformações dúctil e rúptil.

6.2.7. Deformação Dúctil

O mapeamento de estruturas deformacionais dúcteis foi substanciado com o uso da composição colorida 742 de imagens ASTER. Dentre as estruturas que constituem esse grupo, foi possível mapear foliações, dobras e as respectivas zonas de cisalhamento. Para melhor compreensão dos eventos de deformação, a área de estudo foi subdividida em domínios estruturais (A, B e C), tomando como base o Padrão das foliações e a morfologia das dobras (ver a figura 16).

O limite entre os domínios estruturais é caracterizado por mudanças bruscas das direcções de orientação das foliações (**S1**), sendo por isso inferidas como zonas de cisalhamento.

a) Domínio A

O domínio A, localiza-se na região Oeste da área de estudo, figura 14. Esse domínio é caracterizado por foliações **S1**, **S2** e estruturas circulares de pequena e de maior dimensão com as foliações **S1** orientados na direcção **SW-NE** e as foliações **S2** com orientações variadas. Os traços axiais das dobras **F1** são caracterizadas pela orientação **SW-NE** que são paralelas as foliações **S1**. As dobras **F2** são caracterizadas por serem fechadas a abertas, maioritariamente com traços axiais orientados na direcção **SW-NE** e o restante orientados **SE-NW**, pode se afirmar que o domínio A sofreu sucessivas fases de deformação.

b) Domínio B

O domínio B, central, separa-se do domínio anterior (A) por meio de uma zona de cisalhamento sinistral inferida, enquanto do domínio C é separado por uma zona de cisalhamento dextral inferida, ambas com orientação na direcção **N-S**, ver a figura 16. Igualmente ao domínio A, o domínio B é menos representativo em termos estruturais. É caracterizado por foliações **S1**, **S2** e estruturas circulares de pequena e de maior dimensão com foliações **S1** orientados na direcção **SW-NE** e as foliações **S2** são pouco evidentes com uma configuração circular. As dobras **F2** são quase inexistentes, as dobras **F1** com traços axiais orientados na direcção **SW-NE**.

c) Domínio C

O domínio C, representa a região leste da área de estudo, separa-se do domínio B por meio de uma zona de cisalhamento destal inferida. Dentro deste domínio, as estruturas circulares são de menor dimensão e as foliações **S1** evidenciam a presença de dobras (F1), notavelmente isoclinais na parte **SW** do domínio, orientados para **NE-SW** e com orientação **NW-SE** na parte **NW**.

As dobras **F1** passaram por um processo de redobramento através de uma zona de cisalhamento destal com orientação **SW-NE**, que é evidente através das foliações com **S2** orientados na direcção **NW-SE** e as dobras **F2** são não existentes.

Além disso, foram identificados indicadores cinemáticos evidentes, que corroboram a existência de extensas zonas de cisalhamento inferidas. Essas zonas de cisalhamento limitam os domínios estruturais mapeados e são claramente evidentes devido à mudança abrupta de direcção das foliações (**S1**), como pode ser observado na imagem da figura 16 obtida por meio da combinação das bandas 742.

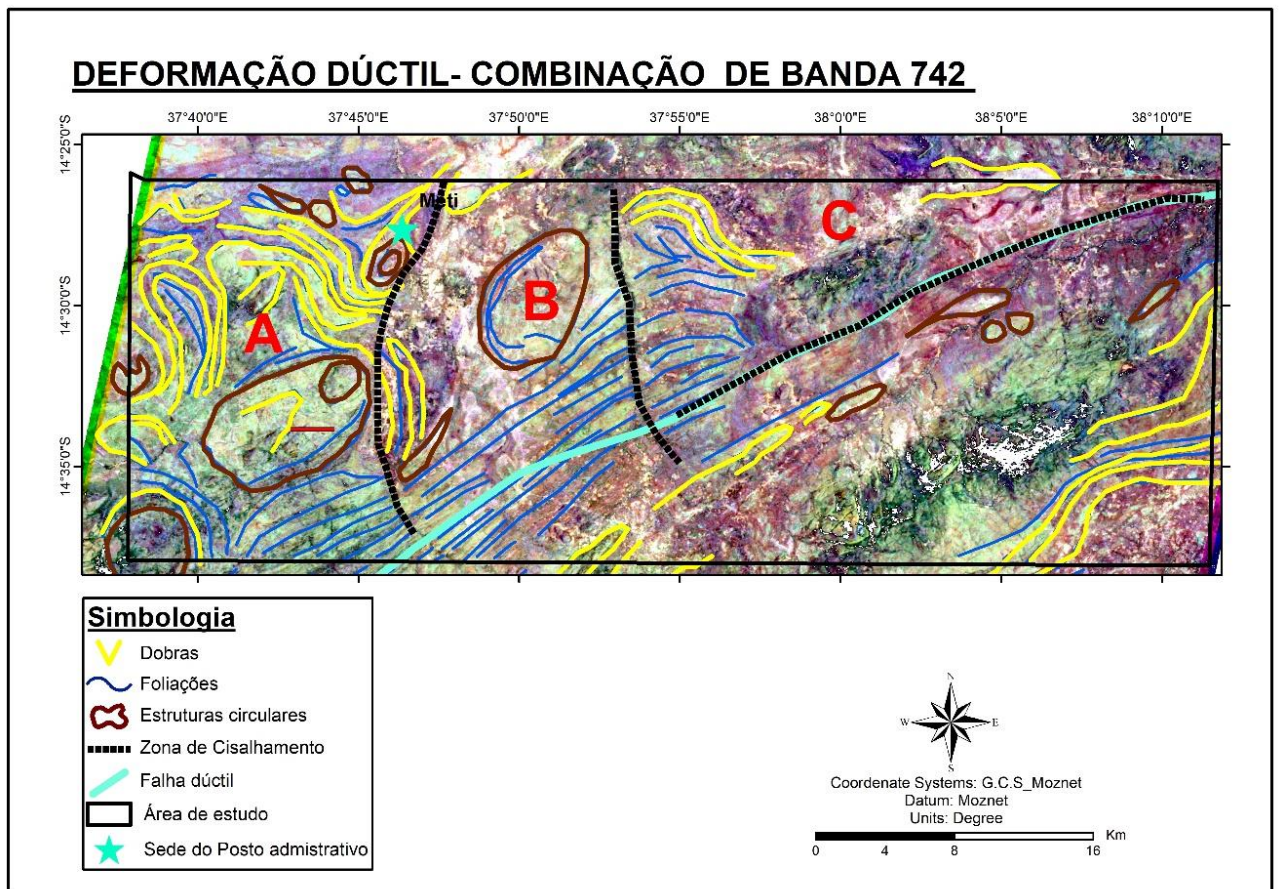


Figura 16: Estruturas deformacionais dúcteis de composição colorida 742 destacando a divisão dos domínios estruturais.

6.2.8. Deformação Rúptil

As estruturas deformacionais rúpteis da área de estudo foram mapeadas através de imagens de composição colorida 751 do sensor ASTER (para mapear falhas e diques) e imagem de relevo sombreado criadas a partir das imagens SRTM, dados sua importância no estudo da evolução geológica da área estudo.

a) Lineamentos

A área de estudo é marcada por diversas famílias de lineamentos que se cruzam a ângulos não superiores à 90°, revelando a presença de fraturas conjugadas. A primeira família, mais densa, consiste em lineamentos predominantemente na direcção **NE-SW**, principalmente na região central e **SW** da área de estudo. O segundo conjunto de lineamentos é mais proeminente, com uma orientação preferencial **NW-SE**, cruzando o conjunto anterior. Além dessas duas principais famílias, também existem lineamentos na direcção **N-S**, embora sejam menos frequentes, como indicado na imagem de relevo sombreado da figura 17.

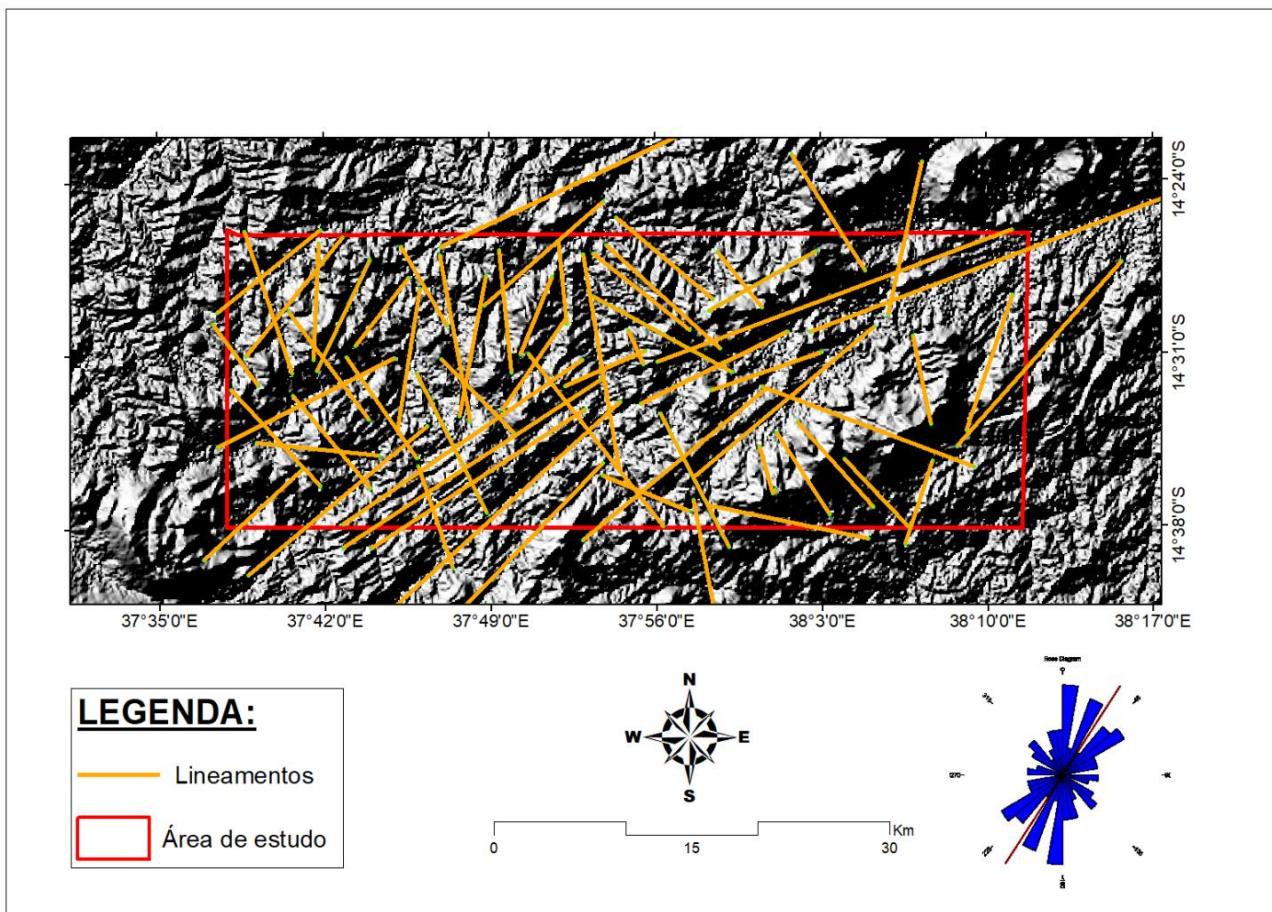


Figura 17: Imagem de relevo sombreado (azimute 315,200,100) graus e inclinação do sol de 45,50,60, graus), destacando as principais famílias de lineamentos.

a) Falhas e Diques

As falhas foram mapeadas com recurso a imagens coloridas obtidas através da combinação de bandas 751 dos subsistemas VNIR e SWIR do sensor ASTER. Dois principais grupos de falhas foram mapeados, tal como se pode observar na figura 18. As falhas orientadas na direcção N-S e SE-NW são as mais predominantes na área de estudo, na região Oeste e na zona central. Por sua vez, as outras famílias de falhas possuem uma direcção de orientação NE-SW, as quais constituem o segundo grupo de falhas predominantes na área de estudo. Os diques mapeados são predominantes com direcções orientadas a NW-SE principalmente na zona SW da área de estudo.

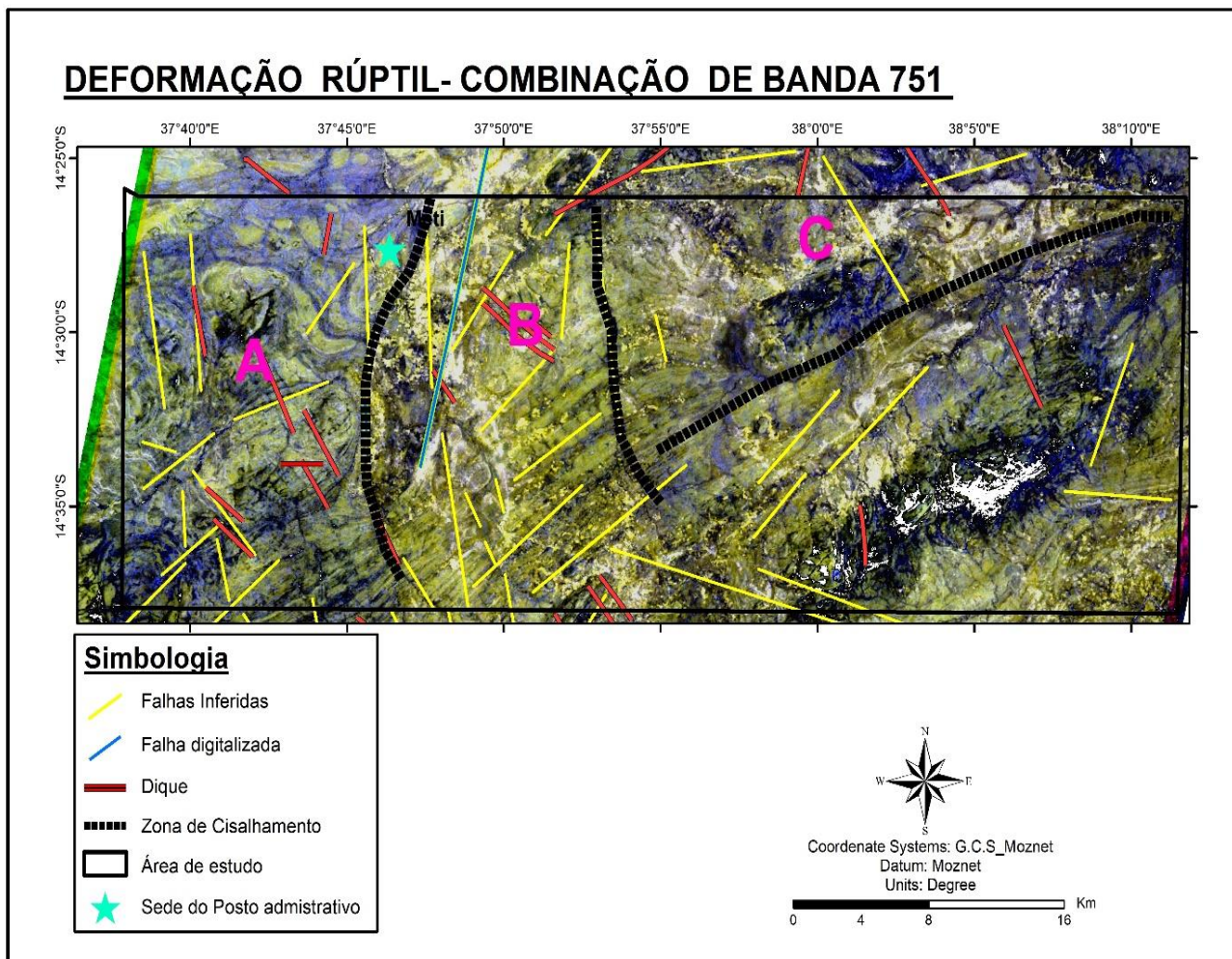


Figura 18: Imagem de composição colorida 751 mostrando as diferentes orientações de falhas e os diques.

6.2.9. Síntese da geologia estrutural

A partir da orientação das foliações e dos traços axiais foram definidos três domínios estruturais (A, B e C), estes que englobam as diferentes famílias de falhas, lineamentos e corpos circulares/elípticos. Esses três domínios são separados por zonas de cisalhamento, que são caracterizadas por mudanças bruscas das direcções das orientações das foliações, sendo por isso inferidas como Zona de cisalhamento (figura 19).

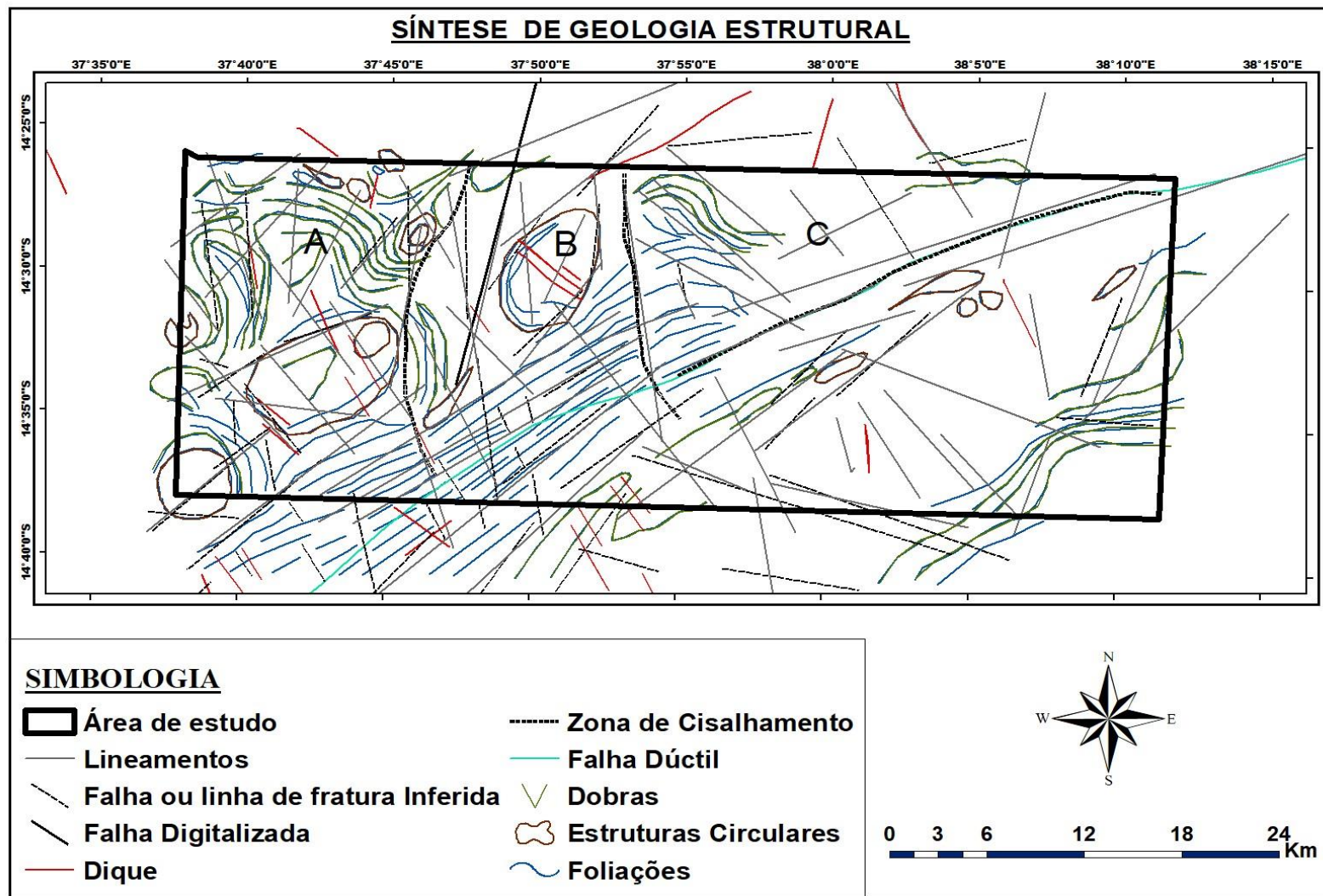


Figura 19: Imagem da síntese da geologia estrutural, apresentando a relação entre as estruturas dúcteis e rúpteis presentes na área de estudo.

7. CAPÍTULO VII: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1. Contexto Litológico

De acordo com os trabalhos levados a cabo pelo GTK CONSORTIUM, 2006, a área de estudo compreende partes dos Complexos Mesoproterozóicos de Nampula, Marrupa e Neoproterozóico de Ocuá. O Complexo de Nampula é constituído essencialmente por ortognaisses intrusivos de composição granítica e rochas supracrustais (gnaisses biotíticos tonalíticos anfíbolíticos). O Complexo de Marrupa é constituído por gnaisses quartzo feldspatos, quartzitos, Charnokitos, mármore, gnaisses granodioríticos, migmatitos bandados com foliação tectónica, rochas de composição calco-alcalina, representadas por tonalitos, trondjemitos e grano-monzonitos que constituem o núcleo de antifomes. O Complexo de Ocuá forma uma melange tectónica dominada essencialmente por rochas granulíticas, que compreendem gnaisses granulíticos máficos a félsicos, ortognaisses de composição granítica a anfíbolítica e paragnaisses.

A análise da distribuição litológica e sua comparação com o mapeamento histórico do GTK CONSORTIUM 2006) demonstrou a alta eficácia da Teledeteção ASTER para o mapeamento geológico detalhado na região do Cinturão de Lúrio.

O presente estudo não só validou a discriminação de todas as unidades geológicas previamente mapeadas pelo GTK 2006), como também evidenciou o aprimoramento no nível de detalhe. O uso da resolução espacial de 15m e 30m do ASTER, em conjunto com a análise espectral TIR, possibilitou a distinção de novas unidades litológicas (corpos félsicos e depósitos aluvionares) que, devido à escala menor do mapa GTK 1:250.000), não foram previamente discriminadas ou foram englobadas em unidades maiores.

Isto justifica a aplicação da Teledeteção, pois fornece uma visão refinada e actualizada da geologia de superfície, o que é crucial para prospecção mineral e para a delimitação precisa das unidades no Complexo de Ocuá em Moçambique.

A identificação de corpos félsicos na área de estudo foi aprimorada significativamente por uma abordagem metodológica combinada, que integra análises espectrais da imagem ASTER e características geomorfológicas. Espectralmente, as litologias mapeadas como corpos félsicos apresentam altos valores de índice de sílica. Isso é claramente evidenciado nas imagens de índice de sílica (razão de bandas 13/12), conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11. Essa razão de bandas é um

indicador robusto da presença de minerais ricos em sílica, característicos de corpos félsicos. Além disso, a imagem que combina razões de bandas 12/13, 11/12 e 13/12, apresentadas na Figura 12, reforça essa interpretação ao destacar as assinaturas espectrais típicas de litologias félsicas. Complementar a essa base espectral, a abordagem geomorfológica revelou que a litologia em questão exibe um relevo positivo acentuado, com as ocorrências predominantemente em áreas montanhosas. Isso é inequivocamente demonstrado pelo mapa topográfico (figura 5) e, com ainda maior clareza, pelos modelos 3D (anexos 3 a 6). Este padrão topográfico não é aleatório, ele é um reflexo directo da maior resistência intrínseca dessas rochas à erosão, mesmo sob a forte influência dos agentes intempéricos. A persistência dessas elevações sugere que as rochas félsicas subjacentes são significativamente mais resistentes do que as litologias circundantes, resistindo ao desgaste e à remoção de material ao longo do tempo geológico (Press et al., 2008). Em suma, a combinação de evidências espectrais consistentes, com a composição félsica e a correlação directa com formas de relevo positivas e resistentes à erosão, fornece um suporte robusto para a interpretação dessas litologias como corpos félsicos.

Para identificar os depósitos aluvionares, integrou-se a análise espectral da imagem ASTER, com as informações geomorfológicas e os padrões de drenagem da área de estudo. A análise espectral revelou assinaturas distintas, como valores altos de índice de sílica, evidenciado pela imagem de índice de sílica 13/12 (figuras 10 e 11) e a imagem que combina razões de bandas 12/13, 11/12, 13/12 (figura 12), consistente com a origem de rochas félsicas. O intemperismo das rochas félsicas, que contêm biotite, resulta na decomposição desse mineral, liberando íons de ferro que oxidam, formando óxidos de ferro, enquanto o quartzo, por sua resistência, permanece preservado durante os processos intempéricos e contribui para a formação dos depósitos aluvionares ricos em sílica (Nesbitt, 1986). Complementarmente, as características geomorfológicas foram cruciais: a identificação do baixo relevo e planícies fluviais no mapa topográfico (figura 5) e modelos 3D (anexos 3 a 6), confirmou o ambiente de acumulação, ou seja, o material que compõe os depósitos aluvionares é oriundo de áreas mais elevadas, que sofreram intemperismo e foram transportados em suspensão pelas águas dos rios. A acumulação desses sedimentos em bancos e planícies de inundação ao longo dos cursos d'água, resultou na formação desses depósitos (Press et al., 2008). Finalmente, os padrões de drenagem forneceram evidências conclusivas, com a convergência de linhas de drenagem (figuras 5 e 15), indicando zonas activas de assoreamento e deposição de sedimentos, evidenciando assim a delimitação dos depósitos aluvionares.

Segundo os mapeamentos do GTK CONSORTIUM, 2006 e Norconsult Consortium, 2007, a área de estudo insere-se a uma zona com rochas metamórficas de protólito félsico e intermediário. No

entanto, as imagens ASTER utilizadas revelaram um significativo conteúdo de óxido de ferro nessas formações, estendendo-se por praticamente toda a área investigada (figura 14). Esse padrão é corroborado pela imagem que combina as razões de bandas 12/13, 11/12 e 13/12, destacando a presença de rochas ricas em minerais máficos em grande parte da extensão da área de estudo (ver figura 12).

Os elevados índices de óxidos de ferro na área de estudo, podem ser atribuídos a múltiplas origens. Uma contribuição significativa, pode ser atribuída ao reajuste de minerais ferromagnesianos nos protólitos félsicos, durante sucessivos episódios metamórficos, onde o ferro presente nesses minerais pode ser remobilizado e oxidado, formando óxidos de ferro (Bucher & Grapes, 2011). Além disso, a acção de agentes intempéricos sobre rochas félsicas expostas à superfície é um fator importante, pois os minerais que contêm ferro (mesmo em pequenas quantidades, como biotite) podem oxidar e formar óxidos de ferro (como hematite), que são muito resistentes e podem se acumular (Tucker, 2001). Finalmente, à contribuição de diques gabróicos que, possivelmente, intruíram nas rochas do embasamento a partir do magmatismo básico da Orogenia Pan-Africana (Afonso, 1976). Esses diques gabróicos, ao intruir nas rochas do embasamento, contribuíram para a variação química na composição das rochas, resultando nos elevados índices de óxido de ferro observados na área de estudo.

7.2. Contexto Estrutural

As estruturas referenciadas neste trabalho, tratam-se de dobras, lineamentos, falhas/fracturas, falhas de cisalhamento, diques e estruturas circulares.

7.2.1. Deformação Dúctil

A disposição dos planos axiais das dobras indica que a evolução tectono-estrutural da área de estudo foi caracterizada por duas fases principais de dobramento.

A primeira fase, resultou na formação das dobras (F1) em todos os domínios estruturais, cujos traços axiais têm uma orientação paralela em relação as foliações S1. Provavelmente o primeiro evento de deformação que originou as dobras F1, tenha resultado do evento de compressão Pan-africano na direcção NW-SE. Conforme indicado pelo Norconsult Consortium, 2007, essas compressões resultaram em paleotensões e tiveram uma influência sobre os gnaisses Mesoproterozóicos que compõem os Complexos de Nampula e Marrupa.

Durante o evento termo-tectónico Pan-Africano, ocorreu uma intensa actividade geodinâmica, marcada pela colisão e interação de placas tectónicas. A fase de deformação desse evento desempenhou um papel crucial na configuração das foliações observadas na área de estudo. Entretanto, é importante ressaltar que algumas dessas dobras podem ter uma origem associada à última fase deformacional, ou possivelmente aos últimos estágios dessa fase, relacionada à tectónica compressional que coincidiu com o magmatismo durante a Orogenia Pan-Africana, ocorrida aproximadamente entre 520 e 510 milhões de anos atrás, conforme documentado pelo Norconsult Consortium, 2007.

Durante esse período crucial da evolução geológica, a interação entre processos tectónicos e magmatismo desempenhou um papel significativo na configuração das feições estruturais presentes na área de estudo. A tectónica compressional, associada à colisão de placas e ao evento Pan-Africano, gerou condições propícias para a formação de dobras adicionais, cuja génese pode ter ocorrido nos estágios finais dessa fase deformacional.

As dobras F1 foram sujeitas a uma segunda fase de deformação que originou a segunda geração de dobras, designadas por F2, marcando assim a segunda fase de deformação.

As dobras do tipo F2, por outro lado, são atribuídas, conforme mencionado por (Ueda et al., 2012), aos últimos estágios da fase deformacional principal, possivelmente associada à tectónica compressional na direcção NE-SW. Essa compressão é interpretada como parte do processo evolutivo do Cinturão do Lúrio, caracterizando, assim, a formação desses dobramentos.

A tectónica compressional, agindo na direcção NE-SW, desempenhou um papel crucial nos últimos estágios da deformação, moldando as dobras (F2) com orientação NW-SE observadas na área de estudo. Essa relação directa com a evolução do Cinturão do Lúrio destaca a influência significativa dos processos tectónicos na configuração da estrutura geológica regional.

Ao considerar a direcção NE-SW da compressão associada a essas dobras, a compreensão dos mecanismos tectónicos que actuaram durante a evolução do Cinturão do Lúrio torna-se fundamental para a formação das foliações tipo S2. A destacar a configuração das foliações (S2), que formam domos e bacias.

Durante o presente trabalho foram encontrados indicadores cinemáticos, que comprovam a existência de extensas zonas de cisalhamento inferidas e que limitam os domínios estruturais mapeados e são evidentes devido a mudança brusca de direcção das foliações (S1), como se pode observar na imagem da figura 16, obtida através de combinação de bandas 742.

7.2.2. Deformação Rúptil

A deformação de natureza quebradiça originou falhas e lineações que cortam todas as gerações de dobras descritas anteriormente. As imagens espectrais obtidas pelos sensores ASTER e SRTM revelaram variações significativas na deformação das rochas na área de estudo, evidenciando uma intensidade maior na região Oeste e central comparativamente a região Este, como ilustrado nas (figuras 17 e 18).

As falhas com orientação NW-SE, em sua maioria, revelam um notável paralelismo com as principais falhas da Orogenia Pan-Africana (Norconsult Consortium, 2007). A possibilidade de reactivação dessas falhas durante a abertura e evolução do Sistema de Rift Este Africano é considerável, indicando um papel crucial desse sistema na dinâmica da tectónica da região.

Conforme designada por (Ueda et al., 2012) a estrutura de destaque, associada a essas falhas, é a zona de falhamentos conhecida como Gúruè-Cuamba Corridor. A zona consiste em falhas possivelmente transcorrentes que intersectam o Cinturão do Lúrio numa direcção NW-SE. Essa observação sugere uma possível reactivação de falhas antigas inicialmente inactivas, desencadeada pelo Sistema do Rift Este Africano. A família de falhas com orientação NE-SW a sua origem está associada a formação do Cinturão de Lúrio.

Na área, é notável a presença de diversas falhas e fraturas com orientação N-S. Intrigantemente, essas estruturas cortam praticamente todas as intrusões formadas durante o magmatismo da Orogenia Pan-Africana. Tal evidência aponta para a conclusão de que essas falhas N-S tiveram sua origem em actividades tectónicas posteriores à aquelas associadas à referida orogenia.

7.2.3. Falhas de Cisalhamento

As falhas de cisalhamento identificadas neste estudo apresentam características distintas, sendo duas delas orientadas paralelamente à direcção N-S, enquanto a terceira segue a mesma orientação do Cinturão do Lúrio.

O paralelismo que essa falha apresenta com a estrutura do Lúrio, especialmente no segmento onde esta segue a orientação NE-SW, indica uma origem comum com a estrutura principal, ou seja, o Cinturão do Lúrio. Esse alinhamento sugere que essas estruturas de cisalhamento compartilham

uma história evolutiva intrinsecamente ligada à formação do cinturão geológico dominante na região.

As duas primeiras falhas estão associadas à orogênese Pan-Africana e aos complexos gnéissicos que foram justapostos ao longo de contactos tectónicos de empurrão e sofreram enterramento profundo. A convergência ao longo do Cinturão do Lúrio resultou na formação de um melange tectónico e metamorfismo em fácies granulito de alta pressão com cerca de 550 Ma (Boyd et al., 2010) & (Bingen et al., 2009).

7.2.4. Estruturas Circulares/elípticas

Os corpos geológicos de forma circular/elíptica conhecidos na área em estudo consistem, segundo a Norconsult Consortium, 2007, de granitos, monzogranitos e sienitos que durante a actividade magmática relacionada a Orogenia Pan-Africana, instalaram-se ao longo das principais fracturas/falhas, na sua maioria de origem relacionada a actividade tectónica da mesma Orogenia.

Estas intrusões, juntamente com outras de geometria não circular/elíptica, mas da mesma actividade magmática, foram, segundo a Norconsult Consortium, 2007, agrupadas numa única unidade geológica formal, a Suíte de Malema.

7.2.5. Diques

Em mapeamento de campo, a Norconsult Consortium, 2007; verificou que ocorrem diques, tanto de composição granítica, como de composição gabróica. Segundo a Norconsult Consortium, 2007; estes diques terão sido originados, durante o Câmbrico, a quando da actividade magmática da Orogenia Pan-Africana, e instalando-se principalmente ao longo de planos de falhas de orientações preferenciais (N-S, NE-SW e NW-S).

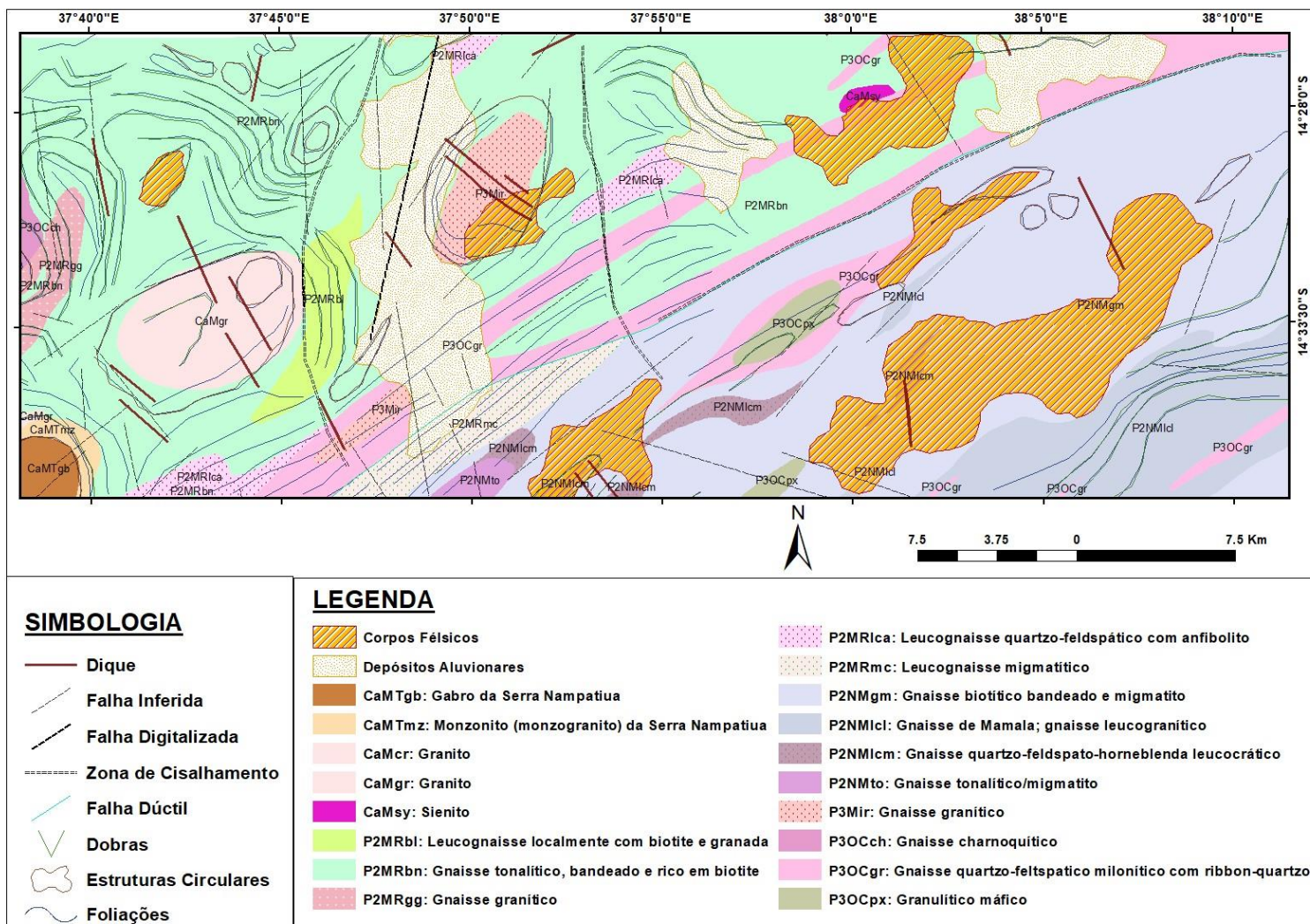


Figura 20: Mapa Geológico-Estrutural actualizado da área de estudo, produzida através de interpretação de imagens de satélite.

8. CAPÍTULO VIII: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1. Conclusões.

- ❖ A partir da análise espectral ASTER, o mapeamento litológico confirmou as unidades gnáissicas principais e distinguiu com maior detalhe novas unidades de corpos félsicos e depósitos aluvionares. O trabalho aprimorou o detalhe da cartografia geológica preexistente na área de estudo.
- ❖ Foram caracterizadas três fases principais de deformação associadas aos eventos Pan-Africanos:
Deformação Dúctil (F1 e F2): F1 originou dobras isoclinais e foliação S1 orientadas SW-NE (direcção do Cinturão de Lúrio). F2 gerou o redobramento destas estruturas com a formação de dobras fechadas a abertas, resultando em estruturas circulares/elípticas (domos/bacias) por interferência e associadas a actividade magmática. B.
Deformação Rúptil (F3): Esta fase gerou falhas e fraturas, sendo as falhas de orientação NW-SE e NE-SW as mais representativas. As falhas NW-SE foram reactivadas ou controlaram o magmatismo (diques) pós-Pan-Africano (Norconsult, 2007).
- ❖ A aplicação integrada dos dados ASTER e SRTM demonstrou alta eficácia para o detalhamento estrutural e a identificação de zonas de cisalhamento com indicadores cinemáticos (orientações N-S e (NE-SW) que controlaram a justaposição dos complexos gnáissicos. A metodologia permitiu alcançar um detalhe superior ao da cartografia de reconhecimento existente.
- ❖ A Carta Geológico-Estrutural actualizada na escala 1:150.000 foi elaborada. Este produto fornece uma base crucial para a prospecção mineral ao delimitar com precisão as principais estruturas de controle (falhas e zonas de cisalhamento), que são alvos para depósitos de Skarn, W, Sn e Mo.

8.2. Recomendações

Com vista a aprimorar a fiabilidade dos resultados e as interpretações apresentados neste projecto científico, recomenda-se que sejam levadas a cabo as seguintes actividades:

- ❖ Utilizar dados geofísicos (ex: Magnetometria e/ou Gravimetria) para robustecer a delimitação dos contactos litológicos (em especial nas zonas de cisalhamento) e para aprofundar a extração de estruturas geológicas em subsuperfície;

- ❖ Realizar um estudo de campo detalhado (validação de terreno) nas unidades litológicas e estruturas críticas identificadas, a fim de confirmar a fiabilidade das interpretações espectrais e morfométricas
- ❖ Promover estudos geocronológicos (ex: datação U-Pb) para interpretar de forma conclusiva a idade absoluta e a sequência temporal das fases de deformação F1, F2 e F3 mapeadas.
- ❖ Desenvolver um estudo geodinâmico detalhado da região para desvendar as origens das forças tectónicas que originaram as principais famílias de falhas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelsalam, M. G., Stern R. J., & Berhane, W. G. (2000).** *Mapping gossans in arid regions with Landsat TM and SIR-C images: the Beddaho Alteration Zone in northern Eritrea. Journal of African Earth Sciences, 30(4), 903–916.*
- Aboelkhair, H., Ninomiya, Y., Watanabe, Y., & Sato, I. (2010).** *Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert of Egypt. Journal of African Earth Sciences, 58(1), 141–151.* <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.01.007>
- Abrams, M., Hook, S., & Ramachandran, B. (2002).** *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. (Vol. 2).* Jet Propulsion Laboratory.
- Abrams, M., Yamaguchi, Y., & Crippen, R. 2022.** *ASTER GLOBAL DEM (GDEM) VERSION 3. June de 2022, pp. 6-11.*
- Abrams, M., Crippen, R., & Fujisada, H. 2020.** *ASTER Global Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). DOI:10.3390/rs12071156 : s.n., 2020, p. 12(7).*
- Afonso, R. S. (1976).** *A Geologia de Moçambique-Notícia Explicativa da Carta Geológica de Moçambique 1:2000000. Direcção de Serviços de Geologia e Minas, República Popular de Moçambique, 175.*
- Almeida, P. J. A., & Oliveira, J. P. (2010).** *Sensoriamento Remoto I São Cristóvão/SE 2010.*
- Andrades, F. (2010).** *Lineamentos Estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM.*
- Barro, R. (2005).** *Avaliação do Modelo Digital de Elevação do SRTM no ortorretificação de imagens Landsat. Angra dos Reis - Rio de Janeiro.*
- Beiranvand, A., & Hashim, M. (2011).** *Application of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data in geological mapping. In International Journal of the Physical Sciences (Vol. 6, Issue 33).* <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- Bingen, B., Jacobs, J., Viola, G., Henderson, I. H. C., Skår, Boyd, R., Thomas, R. J., Solli, A., Key, R. M., & Daudi, E. X. F. (2009).** *Geochronology of the Precambrian crust in the*

Mozambique belt in NE Mozambique, and implications for Gondwana assembly. Precambrian Research, 170(3–4), 231–255. <https://doi.org/10.1016/J.PRECAMRES.2009.01.005>

Boyd, R., Nordgulen, O., Thomas, B., Bingen, B., Bjerkgård, T., Grenne, T., Henderson, I., Melezhik, V., Sandstad, J., Solli, A., Tveten, E., Viola, G., Jacobs, J., & Bauer, W. (2010). *The geology and geochemistry of the East African orogen in northeastern Mozambique. South African Journal of Geology, 113, 87–129. <https://doi.org/10.2113/gssaajg.113.1.87>*

Bucher, K., & Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Springer.*

Cavalcante, N. M., & Da Rocha, R. A. (2010). *Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para técnicos de Geologia e Mineração.*

Cossa, J. A. (2008). *Caracterização Petrográfica e Geoquímica das Rochas Básicas e Ultrabásicas do Complexo de Nampula. Projecto Científico de Licenciatura, Departamento de Geologia, UEM, Maputo.*

Crósta, A. P., Souza Filho, C. R., Azevedo, F., & Brodie, C. (2003). *Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. International Journal of Remote Sensing, 24(21), 4233–4240. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>*

Cudahy, T., & Souza Filho, C.R. (2006). *Spectral sensing solutions to mineral exploration challenges. 4 Simp. Bras. Exploração Mineral Simesmin, Ouro Preto, MG.*

De Andrade, A. S., & DNG Mozambique. (1995). *Notícia explicativa da Carta de jazigos e ocorrências minerais de Moçambique 1/1000000. 1–66.*

De Paula, S. C., Vedovato, L. B., Gomes, D., & Vicente, L. E. (2012). *AVALIAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA CORREÇÃO DE EFEITOS DA ATMOSFERA EM AMBIENTE TROPICAL UTILIZANDO DADOS LANDSAT TM 5. In N° 12510. 6º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica - CIIC 2012 13 a 15 de agosto de 2012– Jaguariúna, SP.*

Du, P., Zhang, H., Yuan, L., Liu, P., & Zhang, H. (2007). *Comparison of Vegetation Index from ASTER, CBERS and Landsat ETM+.*

Elsaid, M., Aboelkhair, H., Dardier, A., Hermas, E., & Minoru, U. (2014). *Processing of Multispectral ASTER Data for Mapping Alteration Minerals Zones: As an Aid for Uranium*

Exploration in Elmissikat-Eleridiya Granites, Central Eastern Desert, Egypt. The Open Geology Journal, 8(1), 69–83. <https://doi.org/10.2174/1874262901408010069>

Engvik, A. K., Tveten, E., Bingen, B., Viola, G., Erambert, M., Feito, P., & De Azavedo, S. (2007). *P–T–t evolution and textural evidence for decompression of Pan-African high-pressure granulites, Lurio Belt, north-eastern Mozambique. Journal of Metamorphic Geology.* <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00736.x>

Ferrier, G., White, K., Bryant, R., & Stefouli, M. (2002). *The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Iesvos, Greece using an integrated remote sensing dataset. International Journal of Remote Sensing*, 23(2). <https://doi.org/10.1080/01431160010003857>

Fujisada, H., Sakuma, F., Ono, A., & Kudoh, M. (1998). *Design and preflight performance of ASTER instrument protoflight model. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1152–1160. <https://doi.org/10.1109/36.701022>

Gabr, S. S., Morsy, E. A., El Bastawesy, M. A., Habeebullah, T. M., & Shaaban, F. F. (2017). *Exploration of potential groundwater resources at Thuwal area, north of Jeddah, Saudi Arabia, using remote sensing data analysis and geophysical survey. Arabian Journal of Geosciences*, 10(23). <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3295-3>

Grantham, G. H., Macey, P. H., Horie, K., Kawakami, T., Ishikawa, M., Kumar, M., Tsuchiya, N., Graser, P., & Azevedo, S. (2013). *Comparison of the metamorphic history of the Monapo Complex, northern Mozambique and Balchenfjella and Austhameren areas, Sør Rondane, Antarctica: Implications for the Kuunga Orogeny and the amalgamation of N and S Gondwana. Precambrian Research*, 234, 85–135. <https://doi.org/10.1016/J.PRECAMRES.2012.11.012>

Grantham, G. H., Marques, J., Wilson, M. G. C., Manhica, V., & Hartzler, F. J. (2011). *Explanation of the Geological Map of Mozambique, 1:1000000.*

GTK CONSORTIUM. (2006). *Map Explanation: Sheets 1430 – 1432 and 1530 – 1534. Geology of Degree Sheets Inhamambo, Maluvera, Chifunde, Zumbo, Fíngoè-Mágoè, Songo, Cazula and Zóbuè, Mozambique. (Volume 4). Ministério dos Recursos Minerais, Direcção Nacional de Geologia.*

Gupta, Ravi P. (2018). *Digital Elevation Model. Remote Sensing Geology (101-106).* 2018.

-
- Hajimirzajan., Karimpour, M. H., Shafaroud, A. M., & Shahri, M. R. (2012).** *Geology, mineralization and geophysical studies to IP/RS Method for the exploration of mineralization zones in the Roudgaz prospect area, southeast of Gonabad, Khorasan Razavi province.*
- Holmes, A. (1951).** *The sequence of Pre-cambrian orogenic belts in South and Central Africa. . 8th International Geological Congress. Great Britain 1948, Part XIV, 254–269.*
- JOGMEC. (2015).** *Extraction of Geological Information using Multi Spectral Sensor data.*
- Johnson, B. R., & Young, S. J. (2000),** “*In-Scene Atmospheric Compensation: Application to SEBASS Data Collected at the ARM Site,*” *Technical Report, Space and Environment Technology Center, The Aerospace Corporation, May 1998.* Hernandez-Baquero, E., “*Characterization of the Earth’s Surface and Atmosphere from Multispectral and Hyperspectral Thermal Imagery,*” *Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester, New York.*
- Júlio, M. B. (2024).** *USO DE IMAGENS ASTER NO MAPEAMENTO LITO-ESTRUTURAL E DE ZONAS DE ALTERAÇÃO-ESTUDO DE CASO DO DISTRITO DE CHIFUNDE, PROVÍNCIA DE TETE. PROJECTO CIENTÍFICO DE LICENCIATURA. DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA, FACULDADE DE CIÊNCIAS, UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE.*
- Kadiembwe, J. F. T. (1992).** *Prospection de grenat a Cuamba. Report prelimineire n° 1831. 17 pg. Republic du Mozambiuque. In Ministere des Ressources Minerales, Institut Nationalde Geologie, Maputo.*
- Kalinowski, A., & Oliver, S. (2004).** *ASTER mineral index processing manual. Remote Sensing Applications: Geoscience Australia.*
- Korkiakoski, E. (2008).** *Geochemical surveys in Mozambique: A data compilation project. 2008.*
- Kröner, A., & Stern, B. (2005).** *Pan-African Orogeny. Encyclopedia of Geology (Second Edition), 259–270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102908-4.00431-8>*
- Kujjo, C. P. (2010).** *Application of remote sensing for gold exploration in the Nuba Mountains, Sudan. May, 1–99.*
- Kusky, T. M., & Ramadan, T. M. (2002).** *Structural controls on Neoproterozoic mineralization in the South Eastern Desert, Egypt: an integrated field, Landsat TM, and SIR-C/X SAR approach. www.elsevier.com/locate/jafrearsci*

-
- Lächelt, S. (2004).** *Geology and Mineral Resources of Mozambique.* Ministério Dos Recursos Minerais e Energia, Direcção Nacional de Geologia, Maputo, Moçambique. 515 p.
- Lächelt, S., & Daudi, E. X. F. (1999).** *Metallogenic epochs and phases in the Mozambican territory.* *Journal of African Earth Sciences*, 28, 40–41.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (2000).** *REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION.* John Wiley & Sons, New York.
- Loughlint, W. P. (1991).** *Principal Component Analysis for Alteration Mapping**.
- Macey, P. H., Miller, J. A., Rowe, C. D., Grantham, G. H., Siegfried, P., Armstrong, R. A., Kemp, J., & Bacalau, J. (2013).** *Geology of the Monapo Klippe, NE Mozambique and its significance for assembly of central Gondwana.* *Precambrian Research*, 233, 259–281. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.012>
- MAE. (2005a).** *Perfil do Distrito de Lalaua da Província de Nampula.* Disponível em <http://www.portaldogoverno.gov.mz/Informacao/distritos/nampula/Lalaua.pdf>. Acessado em 22 de Junho de 2023.
- MAE. (2005b).** *Perfil do Distrito de Malema da Província de Nampula.* Disponível em <http://www.portaldogoverno.gov.mz/Informacao/distritos/nampula/Malema.pdf>. Acessado em 22 de Junho de 2023.
- Marques, J. M. P. R. (2000).** *Gemstones in Mozambique: present status and potential.* *Workshop on Tertiary Sector Geoscience Education in Southern Africa - Building Regional Networks on Local Expertise Maputo. Extended Abstract Volume.*, 103–118.
- Meneses, P. R., & Almeida, T. (2012).** *INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO.*
- Moore, C. A., Hoffmann, G. A., & Glenn, N. F. (2007).** *Quantifying basalt rock outcrops in NRCS soil map units using Landsat-5 data.* *Soil Survey Horizons*, 48(3), 59–62.
- Moreira, A. F., & Santos, S. R. B. (2016).** *CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM FOTÔMETRO DESTINADO AO USO DE AULAS EXPERIMENTAIS DE QUÍMICA SOBRE A LEI DE BEER-LAMBERT CONSTRUCTION AND CHARACTERIZATION OF A PHOTOMETER FOR THE LESSONS OF EXPERIMENTAL CHEMICAL ABOUT BEER-LAMBERT LAW.* 2, 142–151. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.4016>

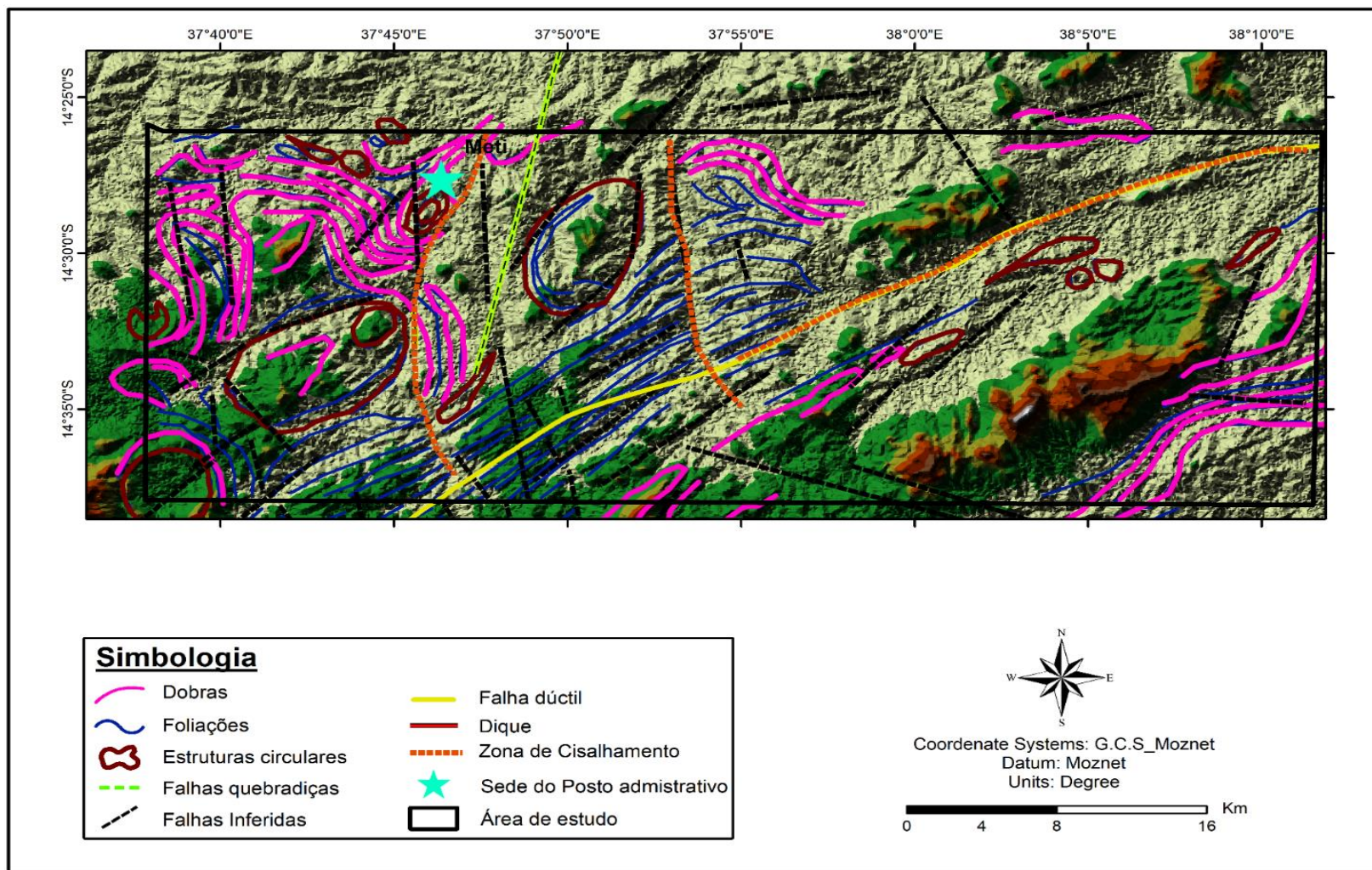
- Nesbitt, H.W., & Young, G.M. (1984).** *Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, n. 7, p. 1523-1534.
- Nopeia, M. A. (2016).** *MAPEAMENTO LITOESTRATIGRAFICO DA FOLHA N°736, ATRAVÉS DE IMAGENS MULTIESPETRAIS DE ALTA RESOLUÇÃO. FACULDADE DE CIÊNCIAS, UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE.*
- Norconsult Consortium. (2007).** *Mineral resources management capacity building project, Republic of Mozambique; component 2: Geological infrastructure development project, geological mapping lot 1. Sheet explanation, Rep. B6. f., 32 sheets, scale 1:250,000. National Directorate of Geology, Maputo, Mozambique. 778 Pp.*
- Pinna, P., Jourd, G., Galvez, J. Y., Mroz, J. P., & Marques, J. M. (1993).** *The Mozambique belt in northern Mozambique: Neoproterozoic (1100-850 M.a.) crustal growth and tectonogenesis, and superimposed Pan-African (800-550) tectonism. Precambrian Research 62. Great Britain, Elsevier Science., 1-62.*
- Pournamdari, M., Hashim, M., & Pour, A. B. (2014).** *Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghan ophiolite complex, south Iran. Advances in Space Research, 54(4), 694-709. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2014.04.022>*
- Press, F., Siever, R., Grotzinger, J., & Jordan, T. H. (2008).** *Para entender a Terra. Bookman Editora.*
- Ramadan, T. M., Abdelsalam, M. G., & Stem, R. J. (2001).** *Mapping Gold-Bearing Massive Sulfide Deposits in the Neoproterozoic Allaqi Suture, Southeast Egypt with Landsat TM and SIR=C/X SAR Images.*
- Real, F. (1966).** *Geologia da Bacia do Rio Zambeze (Moçambique), características geológicas mineiras da Bacia do Rio Zambeze, em território moçambicano. Junta de Investigações Do Ultramar, Lisboa, Portugal.*
- Rokos, D., Argialas, D., Mavrantza, R., Seymour, K., Vamvoukakis, C., Kouli, M., Lamera, S., Paraskevas, H., Karfakis, I., & Denes, G. (2000).** *Structural analysis for gold mineralization using remote sensing and geochemical techniques in a GIS environment: Island of Lesbos, Hellas. Natural Resources Research, 9(4). <https://doi.org/10.1023/A:1011505326148>*

-
- Rosse, D. M. (2009).** *Processamento e Interpretação de Dados Aerogeofísicos de Cabo Delgado em Moçambique. Universidade de Aveiro Ano 2009.*
- Sabins, F. F. (1999).** *Remote Sensing for Mineral Exploration in Australia. Australian Mining, 79(3).* [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)92427-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)92427-2)
- Santos, R. (2005).** *O Uso De Processamento Digital De Imagens Do Sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Aster) Na Identificação De Horizontes Coesos Em Solos Dos Tabuleiros Costeiros Da Bahia. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 246.*
- Shafaroud, A. M., & Karimpour, M. H. (2013)** *Hydrothermal Alteration Mapping in Northern Khur, Iran, Using ASTER Image Processing: a New Insight to the Type of Copper Mineralization, Acta Geologica Sinica (English Edition), Vol. 87, No. 3, pp. 830-82;*
- Sousa, A., & Silva, J. (2011).** *Fundamentos Teóricos de Detecção Remota – Universidade de Évora.* https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4822/1/Sebenta_DR_fundamentosTericos_2011.
- Stern, R. J. (1994).** *ARC ASSEMBLY AND CONTINENTAL COLLISION IN THE NEOPROTEROZOIC EAST AFRICAN OROGEN: Implications for the Consolidation of Gondwanaland. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 22(1), 319–351.* <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.22.050194.001535>
- Tembe, S. C. F. (2016).** *Cartografia geológica digital usando imagens LANDSAT 8 e SRTM. na região de Salunhanga, província de Tete. FACULDADE DE CIÊNCIAS, UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE.*
- Tucker, M. E. (2001).** *Sedimentary Petrology: An Introduction to Sedimentary Rocks and Processes. Blackwell Science.*
- Ueda, Y., Murakawa, H., & Ma, N. (2012).** *Welding Deformation and Residual Stress Prevention.* <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06199-9>
- Unganai, D. A. B. (2016).** *Caracterização Geológico Estrutural da Suite de Guro: Uma Aplicação de Imagens Multiespectrais Aster. Projecto Científico de Licenciatura. Departamento de Geologia, Universidade Eduardo Mondlane.*
- Venturieri, A. (2007).** *Curso de introdução às técnicas de sensoriamento remoto. 60.*

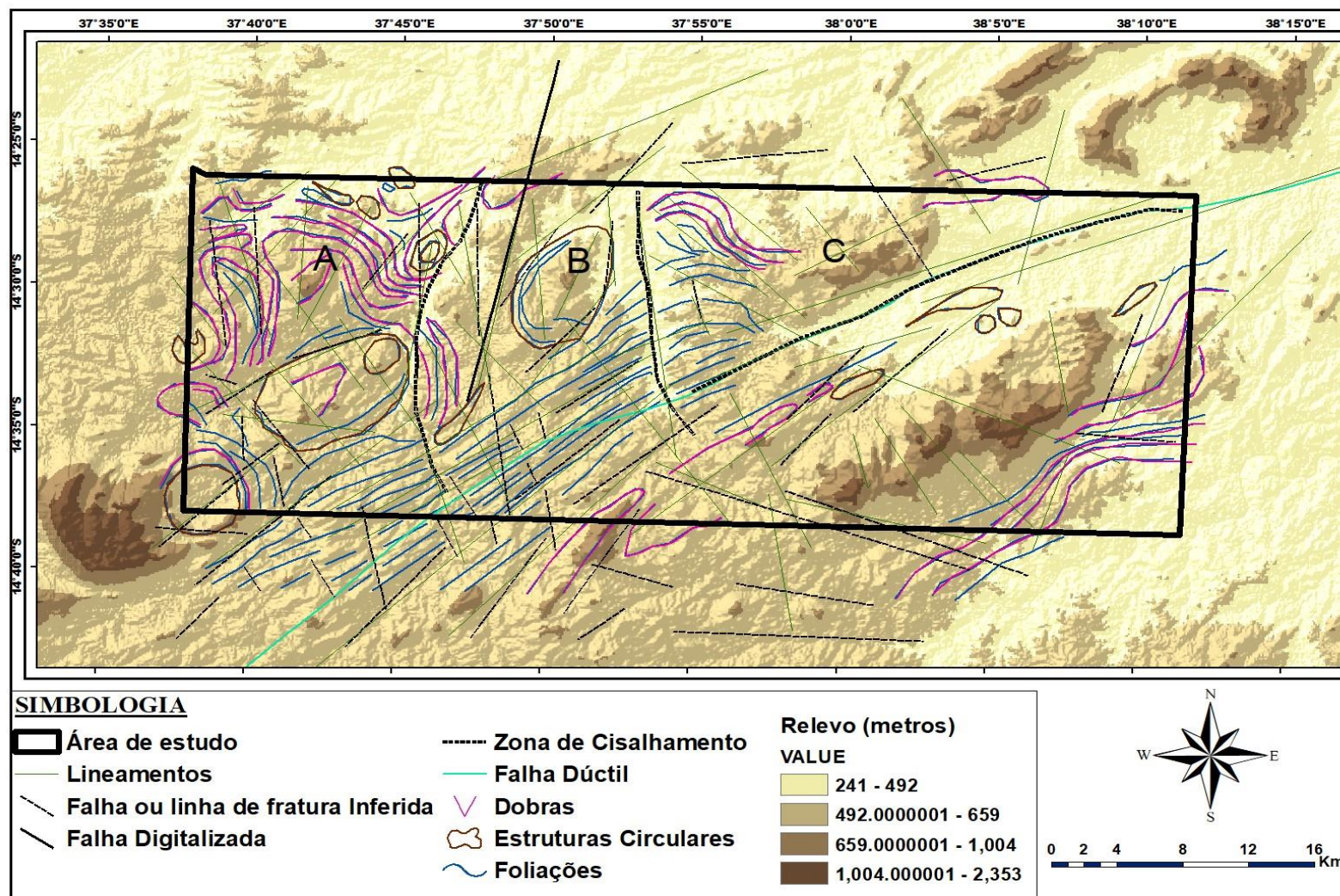
-
- Vicente, L. E. (2007).** *Caracterização de Sistemas Ambientais Tropicais Complexos utilizando análise Sistêmica e Classificação Hiperespectral de dados do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). 192 f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.*
- Viegas, V. G. (2019).** *CONTRIBUIÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO Exemplo de imagens Landsat 8 e ASTER para o Distrito de Macossa, Gorongosa e Marigué. FACULDADE DE CIÊNCIAS, UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE.*
- Viola, G., Henderson, I. H. C., Bingen, B., Thomas, R. J., Smethurst, M. A., & de Azavedo, S. (2008).** *Growth and collapse of a deeply eroded orogen: Insights from structural, geophysical, and geochronological constraints on the Pan-African evolution of NE Mozambique. Tectonics, 27(5), 1–31. <https://doi.org/10.1029/2008TC002284>*
- Yajima, T. (2014).** *Aster Data Analysis Applied to Mineral Resource Exploration and Geological Mapping, Case Study Meiduk Area Located in the Kerman Province of Iran. A Dissertation for the Degree of Doctor of Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univer.*
- Zou, H., & Zou, H. (2013).** *University of Calgary PRISM Repository <https://prism.ucalgary.ca> Lithologic and Mineral Mapping in the Chocolate Mountains, California, Using ASTER Data and Image Processing Techniques. <https://doi.org/10.11575/PRISM/26>*

ANEXOS

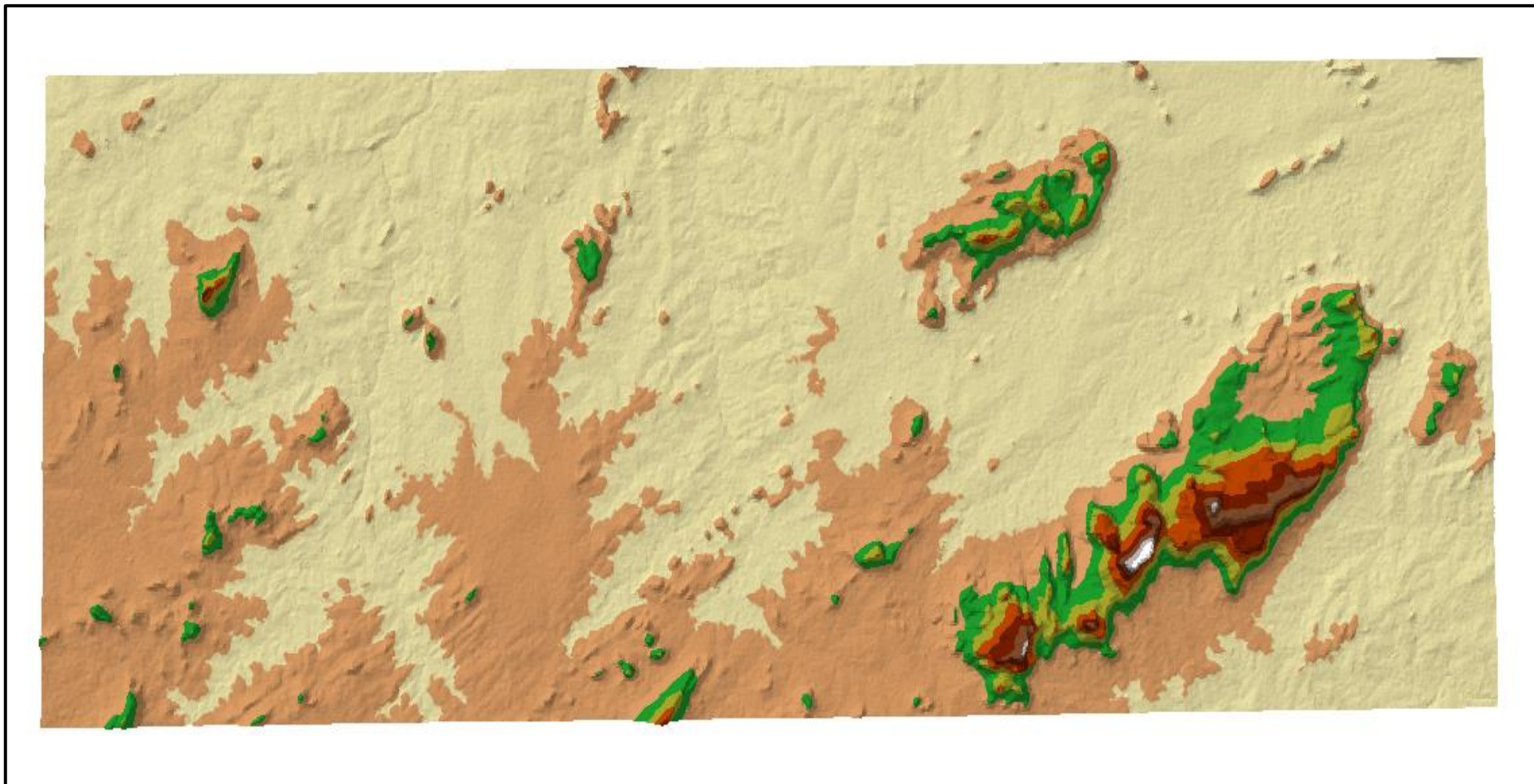
Anexo I: Combinação da topografia com os elementos estruturais da área de estudo e os seus respectivos domínios.



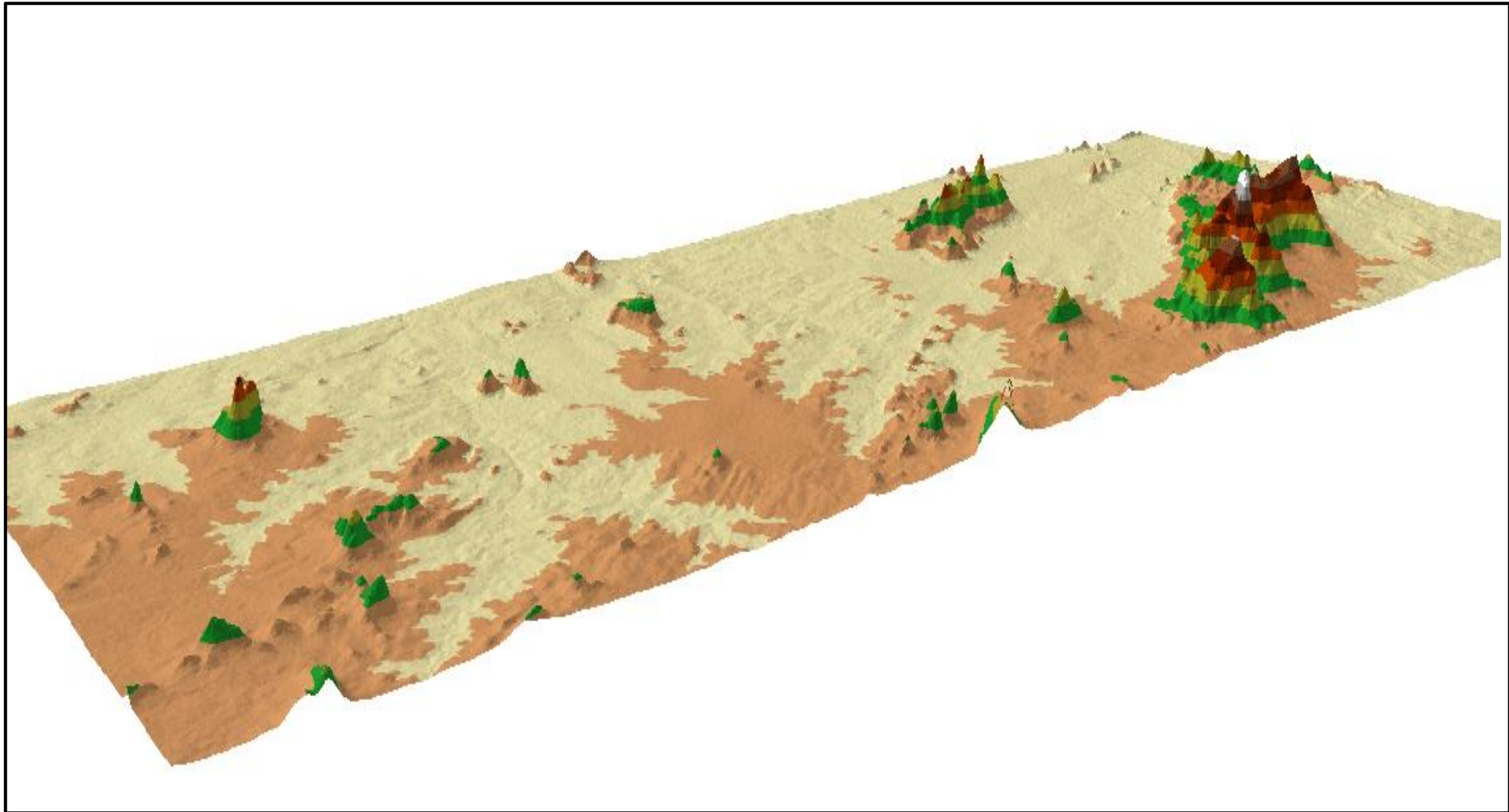
Anexo 2: Relevo versus estruturas geológicas.



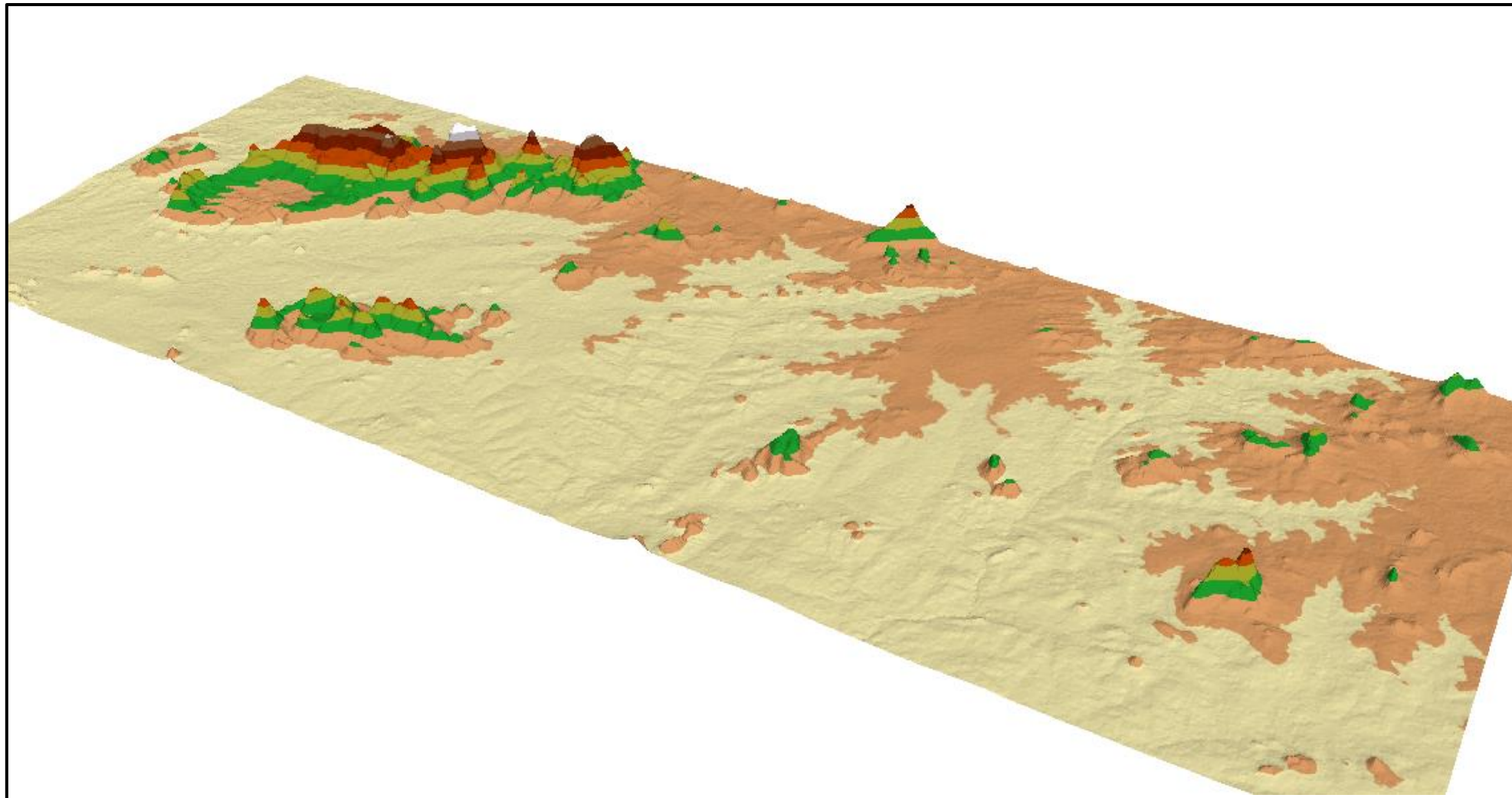
Anexo 3: *Modelação em 3D da área de estudo, vista de cima, as zonas com coloração branca representam zonas de planícies, por onde atravessam os rios e onde se localizam os aluviões mapeados.*



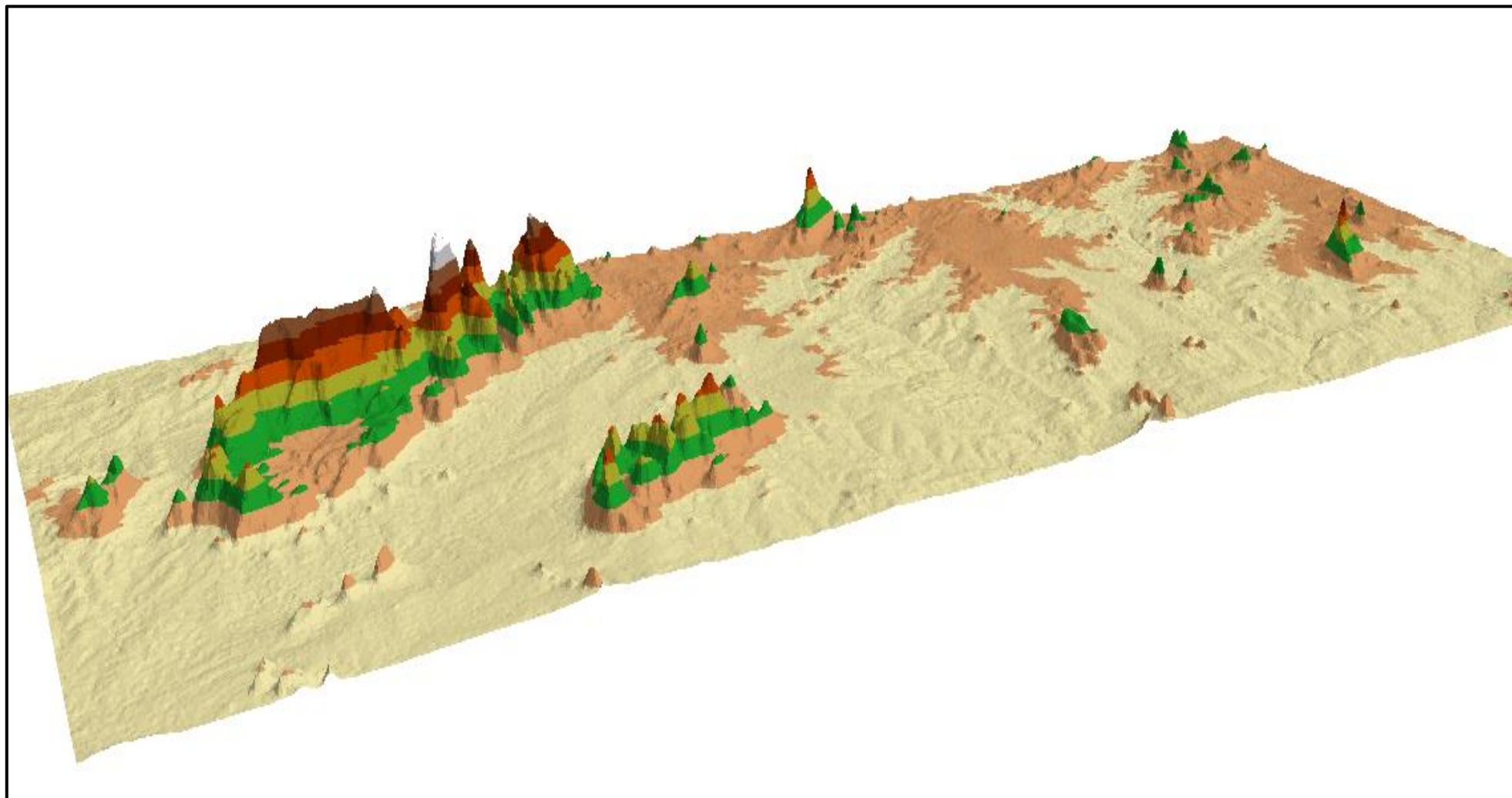
Anexo 4: *Modelação em 3D da área de estudo, vista frontal esquerda, os corpos insolados de coloração verde, amarelo e vermelho representam os corpos puramente félsicos.*



Anexo 5: Modelação em 3D da área de estudo, vista traseira direita.

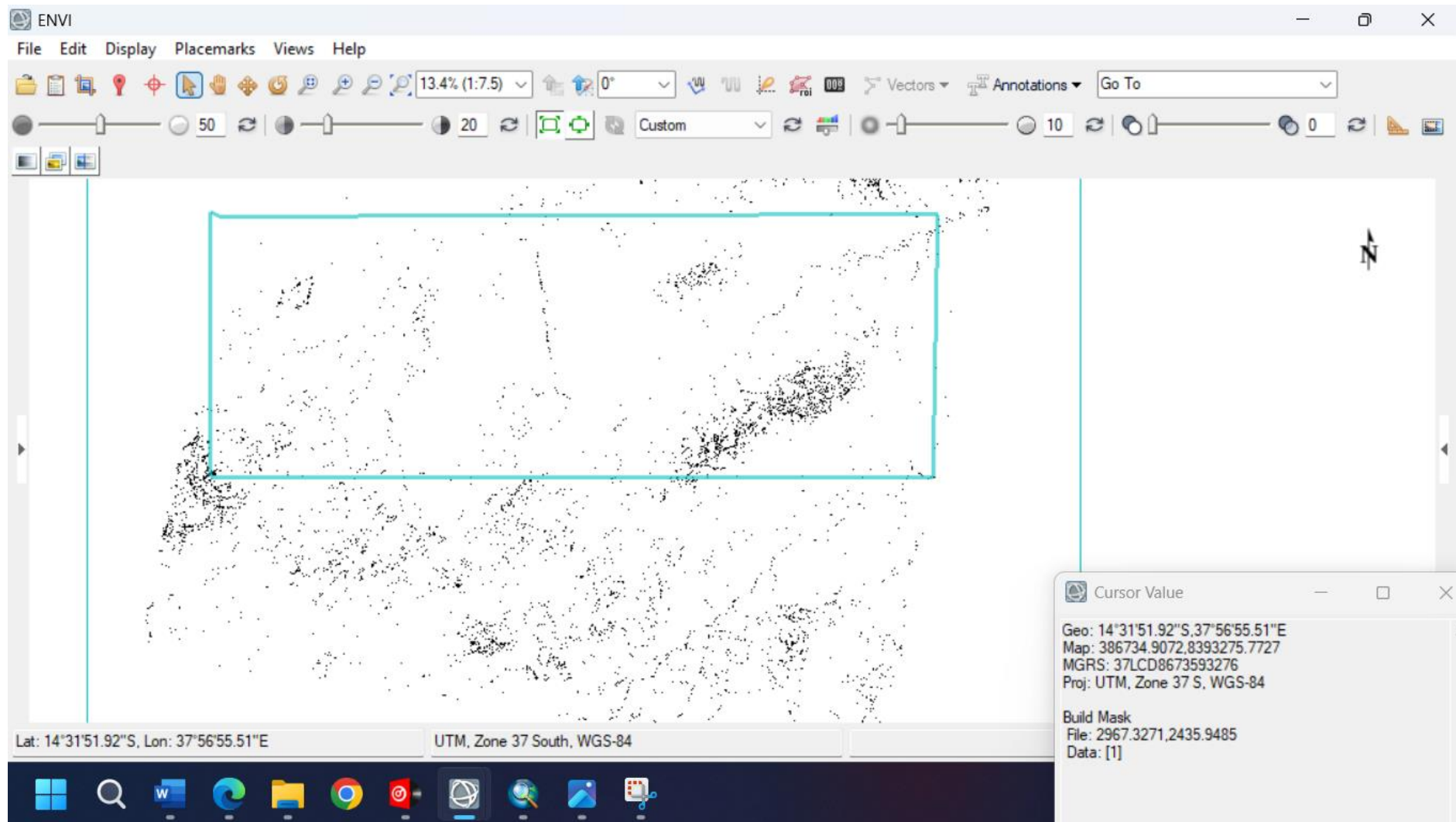


Anexo 6: Modelação em 3D da área

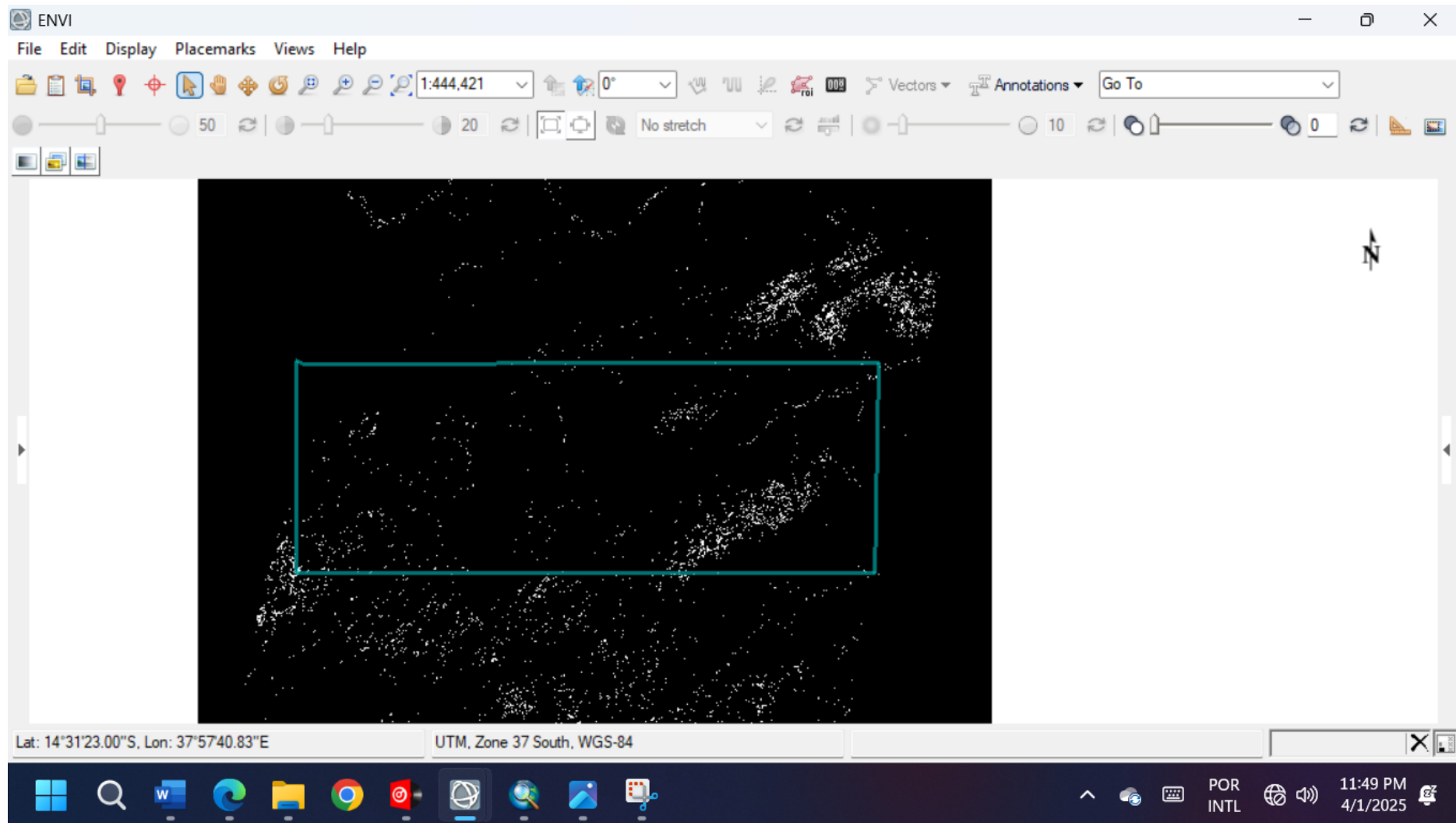


de estudo, vista traseira esquerda.

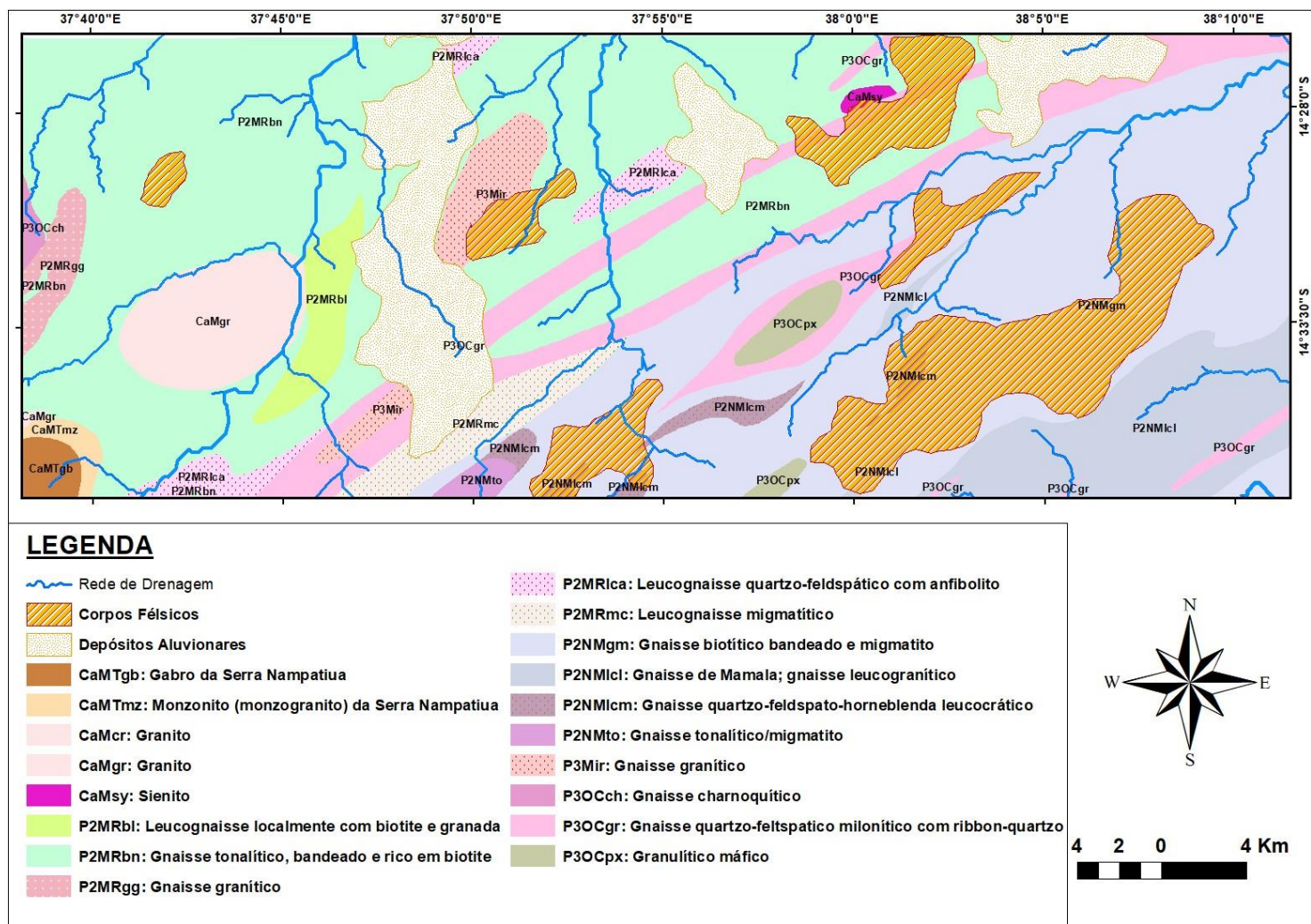
Anexo 7: Máscara de Vegetação da área de estudo aplicada na imagem ASTER. A cor preta representa vegetação muito densa.



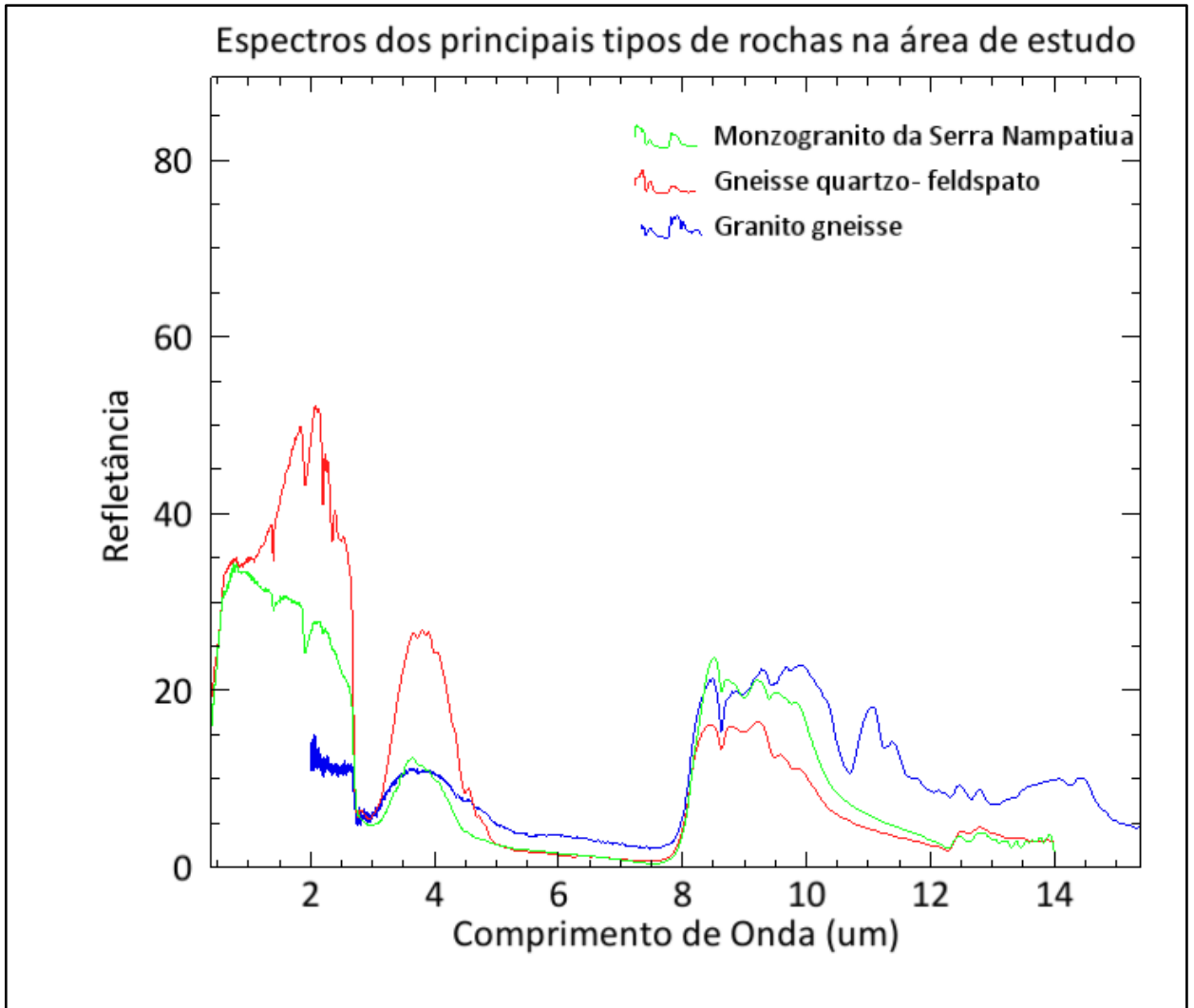
Anexo 8: *Máscara de Vegetação Invertida da área de estudo. A cor branca representa vegetação muito densa.*



Anexo 9: Mapa litológico interpretativo obtido através do processamento digital de imagens ASTER.



Anexo 10: Biblioteca espectral da área de estudo.



Anexo 11: Descrição das bandas de Imagens ASTER (Yajima, 2014 e JOGMEC, 2015).

Zona	Nº da Banda	Intervalo do Espectro (µm)	Resolução Espacial (m)	Aplicação
VNIR	Banda 1	0.52–0.60	15	Identificação de óxidos e minerais de ferro;
	Banda 2	0.63–0.69		
	Banda 3N	0.78-0.86		Identificação da cobertura vegetal.
	Banda 3B	0.78-0.86		Mapeamento de estruturas geológicas
SWIR	Banda 4	1.60-1.70	30	Identificação e mapeamento de zonas e minerais de alteração.
	Banda 5	2.145-2.185		
	Banda 6	2.185-2.225		
	Banda 7	2.235-2.365		
	Banda 8	2.295-2.285		
	Banda 9	2.360-2.430		
TIR	Banda 10	8.125-8.475	90	Identificação e mapeamento de rochas.
	Banda 11	8.475-8.825		
	Banda 12	8.925-9.275		
	Banda 13	10.25-10.95		
	Banda 14	10.95-10.65		

Anexo 12: Principais razões de banda do sensor ASTER usados na cartografia digital (Elsaid et al., 2014; Hashim e Beiranvand, 2011; Kujjo, 2010; Zou, 2013; Aboelkhair et al., 2009; Pour e Hashim, 2014; Shafaroud e Karimpour, 2013).

Feição	Combinação de Bandas ASTER	Comentários		Referência
Ferro				
Ferro Férrico, Fe³⁺	2/1			Rowan and Mars, 2003; Hewson et al., 2001, 2004a
Ferro Ferroso, Fe²⁺	5/3 e ½			Rowan and Mars, 2003
Gossan	4/2			Volesky et al., 2003
Silicatos Ferrosos (biot, chl, amph)	5/4	Alteração de Óxido de Ferro (Cu-Au)		Hewson et al., 2001, 2004a
Óxidos Férricos	<u>4/3</u>	<u>Pode ser ambíguo</u>		Hewson et al., 2001, 2004a
<u>Carbonatos / Minerais Máficos</u>				
Carbonato / Clorite / Epidoto	(7+9)/8			Rowan and Mars, 2003
Dolomite	(6+8)/7			Rowan and Mars, 2003
Carbonato	13/14	Calcite-Dolomite		Ninomiya, 2002
Grupo Hidroxilo	(7/6)*(4/6)			Ninomiya, 2003a
Caulinite	(4/5)*(8/6)			Ninomiya, 2003a
Alunite	(7/5)*(7/8)			Ninomiya, 2003a
Calcite	(6/8)*(9/8)			Ninomiya, 2003a
Silicatos				
Sericite / Muscovite / Illite / Smetite	(5+7)/6	Alteração (filítica)	filixa	Rowan and Mars, 2003; Hewson et al., 2001, 2004a
Alunite / Caulinite / Pirofilite	(4+6)/5			Rowan and Mars, 2003

Muscovite	7/6			Hewson et al., 2001, 2004a
Caulinite	7/5	Aproximado		Hewson et al., 2001, 2004a
Argila	(5×7)*(6×6)			Bierwith, 2002
Alteração	4/5			Volesky et al., 2003
Sílica (SiO₂)				
Rochas ricas em Quartzo	14/12			Rowan and Mars, 2003
Quartzo	$\frac{(11/10)*(11/2)}{[11/(10+12)]*(11/12)}$			Ninomiya, 2003 ^a
Quartzo				Rockwell and Hofstra, 2008
Sílica	(11×11)/10/12			Bierwith, 2002
Sílica	13/12, 12/13			Ninomiya, 2002
Sílica	11/10, 11/12, 13/ 10			Hewson et al., 2001, 2004a

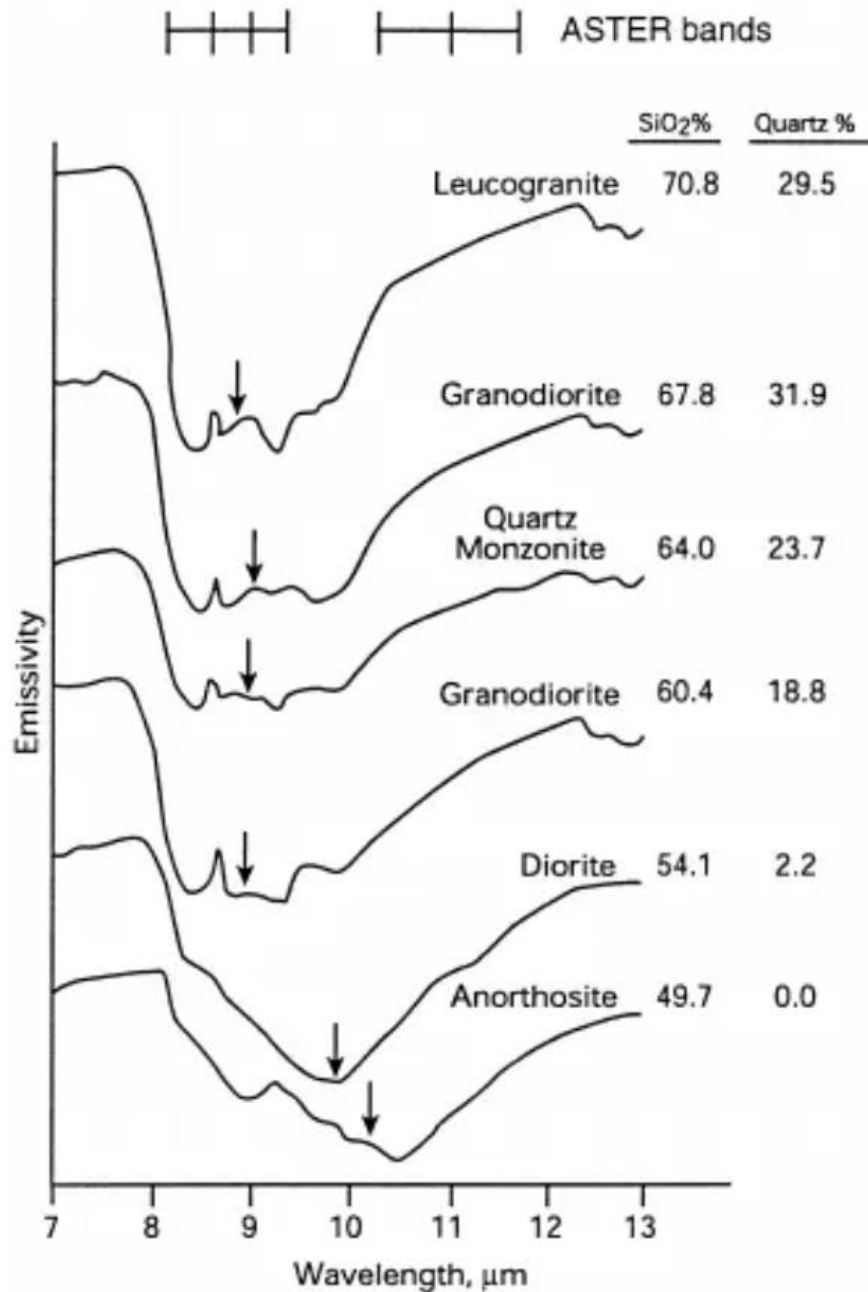
Anexo 13: Common ratio and band combinations from ASTER data. (Kalinowski and Oliver, 2004, citado por Zou & Zou, 2013)

Feature Enhanced	Assigned to Red	Assigned to Green	Assigned to Blue	Reference
Vegetation and Visible Bands*	3, 3/2, or NDVI	2	1	
AIOH Minerals/Advanced Argillic Alteration**	5/6 (Phengite)	7/6 (muscovite)	7/5 (kaolinite)	Hewson et al., 2001, 2004
Clay, Amphibole, Laterite	(5x7)/62 (clay)	6/8 (amphibole)	4/5 (laterite)	Bierwith, 2002
Gossan, Alteration,	4/2	4/5 (alteration)	5/6	Volesky et

Host Rock	(gossan)		(host)	al., 2003
Gossan, Alteration, Host Rock	6 (gossan)	2 (alteration)	1 (host)	
Quartz (Decorrelation Stretch)	13	12	10	Bierwith, 2002
Silica, Carbonate, Basic Degree Index (Carb)	(11x11) /10/12 (silica)	13/14 (carbonates)	12/13 (basic)	Bierwith, 2002
Silica, Carbonate	(11x11) /(10x12)	13/14	12/13	Ninomiya, 2002
Silica	11/10	11/12	13/10	Hewson et al.,
Discrimination for Mapping	4/1	3/1	12/14	
Discrimination in Sulphide Rich Areas	12	5	3	
Silica, Fe²⁺	14/12	(1/2) + (5/3)	MNF Band 1	Rowan and Mars,
Enhanced Structural features	7	4	2	Rowan and Mars, 2003

*Equivalent to Landsat RGB 4-3-2 (Colour Infrared) **Alunite/Pyrophyllite, Mica, Kaolinite/Dickite

Anexo 14: Espectros de emissividade térmica de rochas ígneas com diferentes teores de sílica e quartzo (mudança dos mínimos para comprimentos de onda mais curtos à medida que o conteúdo de sílica aumenta). (Sabins, 1999).



Anexo 15: Índices minerais para o sensor ASTER usando razões de bandas. (Cudahy, et al., 2006).

Feições	Bandas ou razões	Referências
Ferro		
Ferro férrico	2/1	Rowan; CSIRO
Ferro ferroso	5/3+1/2	Rowan
Laterita	4/5	Bierwith
Gossan	4/2	Volesky
Silicatos férricos (biotita, clorita e amfibólio)	5/4	CSIRO
Óxidos de ferro	4/3	CSIRO
Carbonatos/Minerais Máficos		
Carbonato/ clorita/ epidoto	(7+9)/8	Rowan
Epidoto/ clorita/ amfibólio	(6+9)/(7+8)	CSIRO
Anfibólio/ MgOH	(6+9)/8	Hewson
Anfibólio	6/8	Bierwith
Dolomita	(6+8)/7	Rowan; USGS
Carbonato	13/14	Bierwith, Nimoyima, CSIRO
Silicatos		
Sericita/ muscovita/ illita/ esmectita	(5+7)/6	Rowan (USGS); Hewson (CSIRO)
Alunita/ caolinita/ pirofilita	(4+6)/5	Rowan (USGS)
Fengita	5/6	Hewson
Muscovita	7/6	Hewson

Caolinita	7/5	Hewson
Argila	$(5 \times 7) / 6^2$	Bierwith
Alteração	4/5	Volesky
Rocha hospedeira	5/6	Volesky
Sílica		
Rochas ricas em quartzo	14/12	Rowan
Sílica	$(11 \times 11) / (10 \times 12)$	Bierwith
Minerais de baixo grau (garnierita, clinopiroxênio, epidoto e clorita)	12/13	Bierwith, CSIRO
SiO₂	13/12	Palomera
SiO₂	12/13	Nimoyima
Rochas silicáticas	$(11 \times 11) / (10 \times 12)$	Nimoyima
Sílica	11/10	CSIRO
Sílica	11/12	CSIRO
Sílica	13/10	CSIRO
Outras		
Vegetação	3/2	
NDVI	$(3-2) / (3+2)$	