



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

MATHEUS DE FREITAS LEAL LOPES

**ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DE ESTRUTURAS A
PARTIR DE DADOS DE RADAR (SRTM+) NA REGIÃO DA JAZIDA DE P-U DE
ITATAIA-CE**

Fortaleza

2017

MATHEUS DE FREITAS LEAL LOPES

**ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DE ESTRUTURAS A
PARTIR DE DADOS DE RADAR (SRTM+) NA REGIÃO DA JAZIDA DE P-U DE
ITATAIA – CE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do curso de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Geólogo.

Orientador: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(s)

L854a Lopes, Matheus de Freitas Leal.
Abordagem metodológica para extração de estruturas a partir de dados de radar (SRTM+) na região da jazida de P-U de Itaitaia - CE / Matheus de Freitas Leal Lopes. – 2017.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geologia, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Cynthia Romariz Duarte.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Lineamentos. 3. SRTM. 4. Itaitaia. I. Título.

CDD 551

MATHEUS DE FREITAS LEAL LOPES

ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DE ESTRUTURAS A PARTIR DE
DADOS DE RADAR (SRTM+) NA REGIÃO DA JAZIDA P-U DE ITATAIA - CE

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
coordenação do curso de Graduação em
Geologia, da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Geólogo.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a ~~Dra.~~ Cynthia Romariz Duarte (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Elenilton Bezerra Uchoa
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Aos meus pais, Ivonaldo e Vanessa, que apesar de todos os percalços que a vida pregou, sempre me apoiaram até o fim.

À Gabrielly, pela compreensão, paciência e amor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar registrado o meu sincero agradecimento a todos que foram de grande valia na minha formação acadêmica e pessoal durante esse período da minha vida, em especial:

Meus pais pelo enorme esforço que fizeram, desde o confuso início até o momento dessa viagem louca e sem fim que é a geologia.

Meu avô Ivonellio que não mediu esforços para financiar toda minha educação, não deixando faltar nada e sempre me oferecendo o que tinha de melhor. Muito obrigado mesmo, Vô, seus esforços não foram e nunca serão em vão.

Meus avós Roberto e Angélica que, sempre nos momentos mais adequados, vinham com conselhos clarificadores acerca de tudo que antes era nebuloso na minha mente.

Aos meus tios, Taissa e Ederval, Ane e Robertinho, que sempre foram ótimas companhias e pessoas que tenho certeza que posso contar por toda minha vida para qualquer coisa.

Ao meu maior exemplo de geólogo, minha maior inspiração e maior incentivador, meu tio Robertinho. Que um dia possamos trabalhar juntos e rir disso tudo.

A todos os professores do Departamento de Geologia da UFC, em especial minha orientadora, Cynthia, pela paciência e sempre disponibilidade para resolver todos os problemas e dúvidas acerca deste trabalho.

Ao meu amor, Gabrielly, que me aguentou por toda a graduação, passando por momentos bons e ruins sempre ao meu lado.

Ao Governo brasileiro, na pessoa da minha eterna presidenta Dilma, que financiou todo o meu período de intercâmbio na Austrália, por meio do programa Ciência sem Fronteiras.

A Finola e Lughan, família essa que permanecerá para sempre na minha memória, por ter me acolhido como filho e me tratado tão bem durante o ano que passei fora.

“ Tudo sempre dá certo no final. ”

Autor desconhecido

RESUMO

O uso de sensoriamento remoto na avaliação de metas geológicas tem importantes contribuições nos estudos de mapeamento. Por isso, a análise de imagens, considerada o estágio pré e pós-campo, é de fundamental importância nas interpretações geológicas. Lineamento é uma característica mapeável na superfície da Terra, linear, reta ou ligeiramente curvada. Este trabalho visa verificar a integridade dos dados gerados pelo método automático de extração de lineamentos, para complementar o método manual, em uma área piloto, localizada na região da jazida P-U de Itataia - CE. O modelo de elevação digital (MDE) utilizado foi o SRTM + e o *software* para extrair os lineamentos automaticamente foi o Geomatica 2016. A metodologia utilizada para gerar o relevo sombreado multidirecional foi eficiente, tornando o trabalho mais rápido, pois o método de processamento era necessário apenas uma vez. Com o relevo sombreado multidirecional, a resposta gerada pelo método de detecção de bordas foi aceitável e de acordo com a configuração geológica regional. Os dados coletados no campo foram importantes como parâmetro de comparação. A diferença entre a quantidade de lineamentos gerados no método automático e no método manual deve ser mais investigada, de modo a diminuir a frequência dos chamados “ruídos” no método automático, melhorando assim ainda mais os resultados obtidos.

PALAVRAS CHAVE: Sensoriamento Remoto, Lineamentos, SRTM, Itataia

ABSTRACT

The use of remote sensing in the evaluation of geological targets has an important contributions in mapping studies. Therefore, image analysis, considered as pre and post-stage field, has fundamental importance in geological interpretations. Lineament is a mappable feature on the Earth's surface, linear, straight or slightly curved. This work aims to verify the integrity of the data made by the automatic lineament extraction method, in order to complement the manual method. The digital elevation model (DEM) used was SRTM+ and the software to extract lineaments automatically was Geomatica 2016. The methodology used to generate the multi-directional hillshade was efficient, making the work faster, as the processing method was necessary only once. With the multi-directional hillshade, the output made by the edge detection method used by the software was acceptable and according with the geological setting. The data collected on the field was relevant as a parameter of comparison. The difference between the amounts of lineaments generated in the automatic method and in the manual method should be more investigated.

KEYWORDS: Remote Sensing, Lineaments, SRTM, Itataia

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	3
Figura 2 - Gráfico climático de Itataia	4
Figura 3 - Mapa Geomorfológico destacando as duas principais unidades morfológicas da região de Itataia.....	5
Figura 4 – mapa esquemático mostrando as principais unidades geológicas, plutons e zonas de cisalhamento da Província Borborema. As definições de legenda são as seguintes: 1 - Cráton de São Francisco; 2 - sequências de cobertura do cráton; 3 – Embasamento Arqueano; 4 – Transamazonico e embasamento indiferenciado; 5 - cinturões supracrustais; 6 - 1,7-1,5 Ga ortognaisses e meta-anortositos; 7 – Ortognaisses do Cariri Velho; 8 - plutons do Brasiliano; 9 - grabens molassicos; 10 - cobertura Fanerozoica; 11 - principais zonas de cisalhamento transcorrentes, que são CGSZ, Campina Grande; PaSZ, Patos; EPSZ e WPSZ, Pernambuco Oriental e Pernambuco Oeste, respectivamente; GSZ, Granja; SPSZ, Senador Pompeu; E SSZ, Sobral.	8
Figura 26 – Blocos de mármore pertencente à Formação Alcantil, formação essa que foi utilizada nas medições em campo.	13
Figura 27 – Afloramento da formação Barrigas com silimanita-granada-biotita xisto, com strike da camada medindo 195 e mergulhando para NW. Há intercalação com metarcósio de coloração acinzentada.	13
Figura 5 - Imagem SRTM+ cena ponto 63 orbita 217 recortada para a área de estudo.	16
Figura 7 - Fluxograma da metodologia utilizada	17
Figura 8 - Desenho esquemático demonstrando como funciona a altitude solar na geração de mapas de relevo sombreado	18
Figura 9 - Tela de input da configuração das opções verticais no software Global Mapper para a geração das imagens de relevo sombreado de acordo com a metodologia de Brown (2015)	19
Figura 10 - As quatro imagens de relevo sombreado geradas através do SRTM+, com iluminações solares 0°, 45°, 90°, 135° e elevação solar 65° e o resultado da fusão delas.	20
Figura 11 - Ilustração de como funciona o <i>Raster Calculator</i> , onde <i>InRaster 1, 2 e 3</i> são os Rasters de entrada, <i>Expression</i> onde foi aplicada a formula supracitada e <i>Output Raster é a imagem resultada</i> da fusão.	21
Figura 12 – Mapa de lineamentos extraídos manualmente.	22
Figura 13 - Mapa de densidade de linhas extraídas manualmente.	23
Figura 14 - Diagramas de roseta exibindo o azimute dos lineamentos extraídos manualmente.	24
Figura 15 - Valores utilizados na extração de lineamentos por meio do algoritmo LINE.	25
Figura 16 - Mapa de lineamentos gerados automaticamente por meio do algoritmo LINE utilizando os parâmetros propostos.	26
Figura 17 - Demonstração de uma linha composta gerada pelo algoritmo LINE.	26
Figura 18 - Mapa de densidade de linhas da extração automática.	27
Figura 19 - Diagrama de roseta para os lineamentos gerados automaticamente.....	28
Figura 20 - mapa de lineamentos extraídos em campo	28
Figura 28 – Histograma dos lineamentos manuais (a), automáticos (b) e dos medidos em campo (c)...	3

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais reservas de urânio do Brasil.	1
Tabela 2: Esquema da estratigrafia da área de estudo.....	11

Tabela 3 – Valor do pixel no ponto pré-determinado nas quatro imagens com geometrias solares diferentes e na imagem resultante da média das imagens.	21
---	----

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Localização e vias de acesso	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Aspectos Fisiográficos	4
2. Geologia regional	6
2.1 Província Borborema.....	6
2.1.1 Domínio Ceará Central	9
2.1.1.1 Embasamento Arqueano.....	9
2.1.1.2 Terrenos Acrescionários do Paleoproterozoico	9
2.1.1.3 Cobertura Neoproterozoica	10
2.1.1.4 Arco Magmático Santa Quitéria	10
2.2 Mineralização Itataia.....	11
3. Materiais e métodos	14
3.1 Materiais	14
3.2 Métodos	16
4. Processamento e interpretação de dados	19
4.1 Extração manual.....	22
4.2 Extração automática	24

4.3 Medição em campo.....	28
5. Conclusão	4
Referências Bibliográficas	5

1. INTRODUÇÃO

O urânio (U) é um dos mais importantes minerais energéticos. Atualmente seu uso está dividido em três segmentos capitais para a sociedade humana: na indústria energética, uma pequena porção na produção de isótopos medicamentosos e na indústria bélica. Aproximadamente 17% da matriz energética global é gerada por 440 reatores nucleares distribuídos por 30 países e 8% da energia elétrica consumida no mundo é de origem nuclear (IEA, 2003).

O Brasil possui, hoje, a 6ª maior reserva mundial de urânio com 309.370 toneladas de U_3O_8 , o que permite o suprimento de combustível para suas usinas nucleares a longo prazo, além do excedente poder ser utilizado para a exportação. As principais reservas de urânio brasileiras estão distribuídas em sete jazidas: Itataia (CE), Espinharas (PB), Amarinópolis (GO), Lagoa Real (BA), Quadrilátero Ferrífero (MG), Poços de Caldas (MG), Figueira (PR). (INB, 2011).

Tabela 1: Principais reservas de urânio do Brasil.

Ocorrência Depósito-Jazida	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
	< 40US\$/kg U	< 80US\$/kg U	Sub-Total	< 80US\$/kg U	
<u>Caldas (MG)</u>		500t	500t	4.000t	4.500t
<u>Lagoa Real/Caetité (BA)</u>	24.200t	69.800t	94.000t	6.770t	100.770t
<u>Santa Quitéria (CE)</u>	42.000t	41.000t	83.000t	59.500t	142.500t
Outras				61.600t	61.600t
TOTAL	66.200t	111.300t	177.500t	131.870t	309.370t

Fonte: INB (2011).

Atualmente, dentre as jazidas brasileiras de urânio, destacam-se as de Lagoa Real (BA) e Itataia (CE). A jazida de Itataia é de natureza fósforo-uranífera, ocorrendo sob a forma de colofanito uranífero, constituindo-se num exemplo mundial único em áreas cambrianas, onde ocorre mineralização de urânio associada com fosfato, carbonato e matéria orgânica. A sequência metassedimentar de Itataia, de natureza transgressiva, tem na base migmatitos, sotopostos por quartzitos e gnaisses, capeados por mármore calcínicos e dolomíticos. Estes contendo acumulação de matéria orgânica nos fragmentos e matriz de brechas carbonosas e, formando níveis ricos em grafita na transição para subjacentes (MENDONÇA *et. al.*, 1980).

A exploração mineral envolve procedimentos de coleta, análise e integração de dados oriundos de várias fontes. A integração digital de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, de sensoriamento remoto e de outras informações georreferenciadas voltada à prospecção mineral, atualmente é realizada através de *softwares* e *hardwares* específicos, aproveitando o grande avanço das geotecnologias ocorrido nas duas últimas décadas.

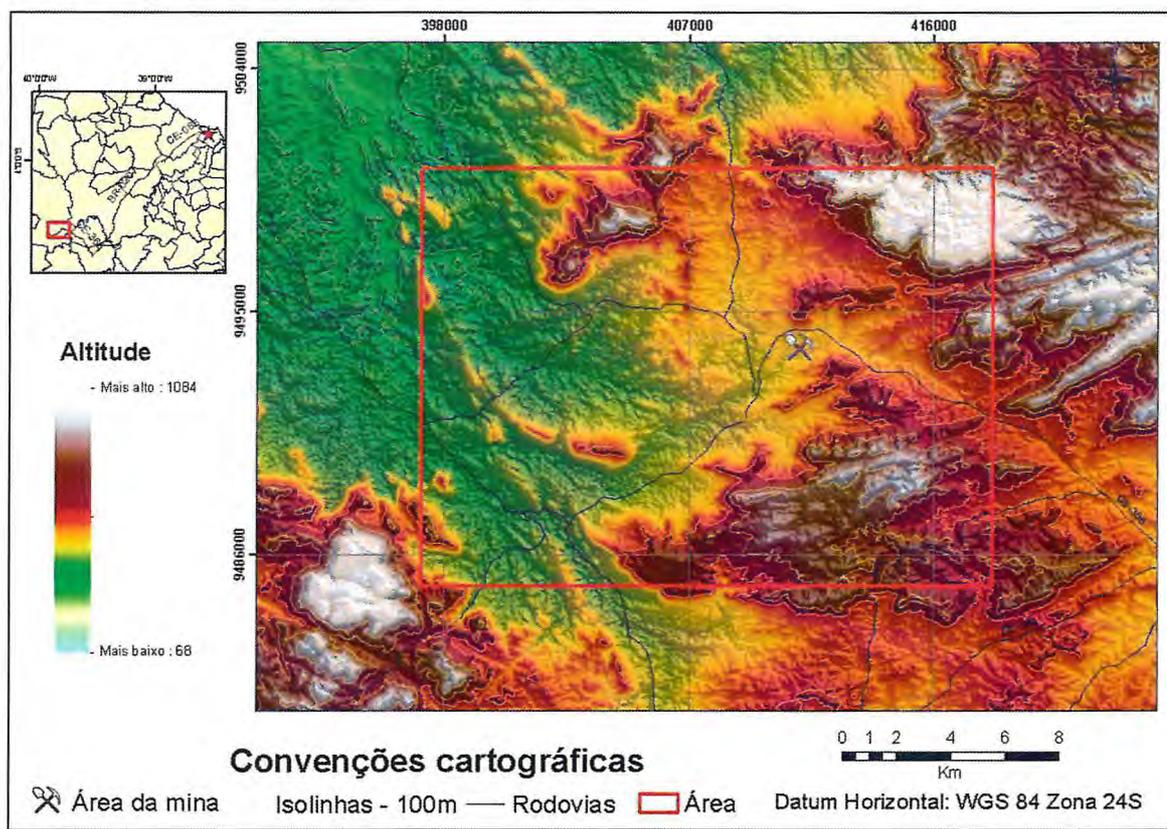
A integração de dados multi-fonte é um dos mais poderosos recursos empregados em Geociências, permitindo uma avaliação de uso combinado, caracterizando assim áreas com maior potencial para exploração. Os avanços nas técnicas e *softwares* para processamento bem como a disponibilidade de dados tem ampliado ainda mais o emprego das técnicas de integração de dados multi-fonte na exploração mineral. Assim, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) surgem como um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação georreferenciada, as quais permitem o gerenciamento de dados espaciais com realização de análises complexas.

Estruturas lineares na superfície terrestre são temas de estudo de geólogos há muitos anos, desde o início do século 20, com Hobbs em 1904. O estudo de lineamentos vem sendo aplicado com sucesso a estudos de geologia estrutural e suas aplicações e investigações de fontes de águas superficiais e sub superfície. Um lineamento pode ser identificado remotamente utilizando duas principais técnicas. Na primeira, o lineamento é realçado utilizando técnicas, como fusão e divisão de imagens, aplicação de filtros direcionais. Na segunda, um mapa de lineamentos pode ser gerado através de *softwares* e algoritmos computacionais

1.1 Localização e vias de acesso

A área de estudo localiza-se no município de Santa Quitéria, na região centro-norte do Estado do Ceará, a aproximadamente 210 km da capital Fortaleza (Figura 1). O acesso é feito a partir da cidade de Fortaleza pela rodovia BR-020, em cerca de 166 km por estrada pavimentada até São José da Macaoca, distrito de Madalena, continuando pela CE-366 que dá acesso, em trecho de 27 km pavimentado, ao distrito de Lagoa do Mato, no município de Itatira. A partir daí, segue-se pela rodovia CE-366, por trecho não pavimentado, por cerca de 11 km.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a comparação entre os métodos de extração de lineamentos estruturais, buscando formas mais rápidas e eficazes de obtenção desses dados, que tem importância fundamental no processo de mapeamento geológico.

Os objetivos específicos são:

- Geração de mapa de lineamentos estruturais obtidos por extração automática;
- Aplicação de diferentes combinações parâmetros dos algoritmos descritos na literatura, cuja escolha deve ser ajustada às características geológicas da área de estudo;
- Geração de mapa de lineamentos obtidos por extração manual;
- Geração de diagramas de roseta para a interpretação dos resultados obtidos pelas diferentes técnicas e parâmetros empregados;
- Validação, em campo, dos resultados obtidos das imagens SRTM+, através da técnica manual e automática de extração de lineamentos.

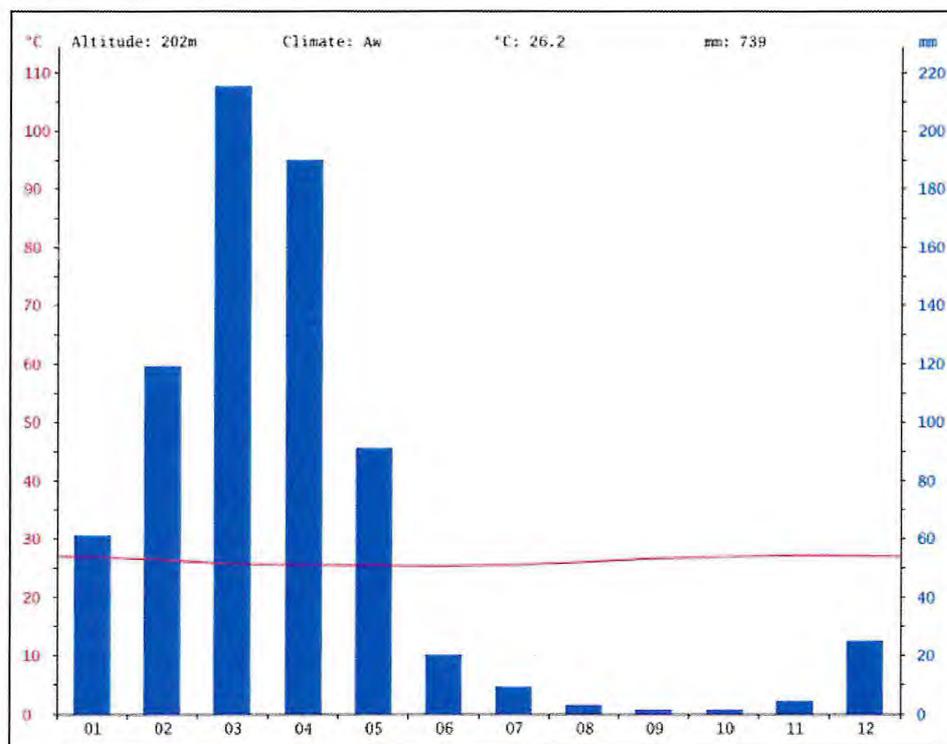
- Comparação estatística dos resultados obtidos pelas diferentes formas de extração de lineamentos.

1.3 Aspectos Fisiográficos

1.3.1 Clima

A região de Itataia situa-se na porção do centro noroeste do Ceará, com clima predominante quente e seco e caracterizado por baixa pluviometria (Figura 2). Com precipitação pluviométrica média anual de 702,7 mm. Normalmente, o período de chuvas tem início no mês de janeiro, prolongando-se até junho, sendo as máximas pluviométricas entre fevereiro e abril. A temperatura média anual é da ordem de 27°C, com variações de 1°C, em torno da média (IBGE, 2011).

Figura 2 - Gráfico climático de Itataia



Fonte: Climate-data.org

1.3.2 Vegetação

A vegetação predominante na região é a caatinga do tipo hiperxerófila. Também são encontradas cactáceas como mandacaru, xiquexique e outras espécies, características do domínio semiárido do Sertão Cearense.

De acordo com o mapeamento fitogeográfico da folha SB.24-V-B, realizado pelo convênio DNPM/RADAMBRASIL (2008) para a INB, a região de Itataia foi dividida em 3 sub-regiões fitoecológicas, que correspondem a:

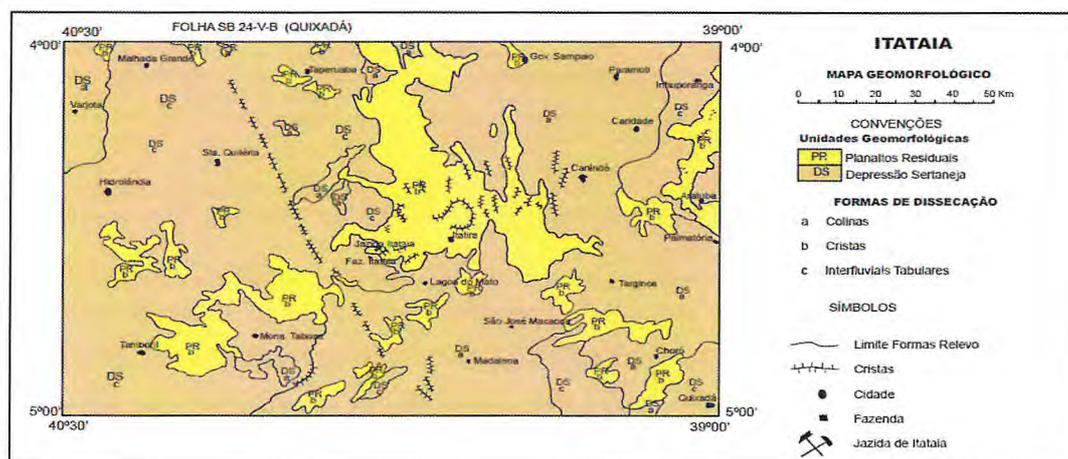
1. Estepe Tropical (Caatinga)
2. Floresta Tropical (Floresta Ombrófila Aberta Tropical e Floresta Estacional Semi-Decidual Tropical);
3. Áreas antrópicas;

1.3.3 Relevo

Estudos realizados a partir do convênio DNPM / RADAMBRASIL / NUCLEBRÁS dividiram a região em duas grandes unidades morfológicas: a Depressão Sertaneja e os Planaltos Residuais (Figura 2).

A jazida de Itataia está inserida na Depressão Sertaneja, que se constitui num compartimento rebaixado e limitado entre os níveis elevados dos planaltos, com altitude média de 350 a 580 m. Os planaltos residuais representam compartimentos de níveis mais elevados da área, com altitudes de 650 a 1.000 metros, correspondendo aos maciços montanhosos das serras do Céu, das Cacimbas, da Mata Fome e das Laranjeiras. A Serra do Céu está a nordeste e a Serra da Mata fome está a sudeste da área de estudo. A Serra do Céu, com cota de 1.085 metros, serve como divisor d'água das bacias hidrográficas dos rios Curu e Groaíras, apresentando uma cobertura vegetal mais densa que a presente no pediplano da depressão circunjacente (NUCLEBRÁS, 2008).

Figura 3 - Mapa Geomorfológico destacando as duas principais unidades morfológicas da região de Itataia.



Fonte: SILVA (2003).

1.3.4 Solos

Devido a longos períodos de seca alternados com escassos e curtos períodos chuvosos, a espessura do manto de intemperismo pode variar de alguns metros até regiões onde este é praticamente ausente. As características comuns às diversas classes de solos são: a pequena espessura, quase sempre inferior a 1,00m; a textura arenosa dos horizontes superficiais e areno-argilosa ou argilosa nos horizontes sotopostos; a ocorrência eventual de *stone lines* ou fragmentos de rochas; e, a baixa saturação de bases trocáveis.

Na região de Itataia ocorrem, preferencialmente, os solos: brunos não cálcicos, planossolos, cambissolos, e algumas associações de solos litólicos e podzólicos vermelho-amarelo eutróficos de baixa permeabilidade (NUCLEBRÁS, 2008).

1.3.5 Hidrografia

A rede de drenagem é constituída por cursos d'água intermitentes sazonais de pequena energia, formando vales largos e configurando um padrão de drenagem predominantemente dendrítico, localmente estruturado, em zonas de cisalhamento e áreas mais fraturadas. Na região de Itataia o sistema hidrográfico mais importante é o da bacia do rio Groaíras, pertencente ao sistema Acaraú (NUCLEBRÁS, 2008).

2. GEOLOGIA REGIONAL

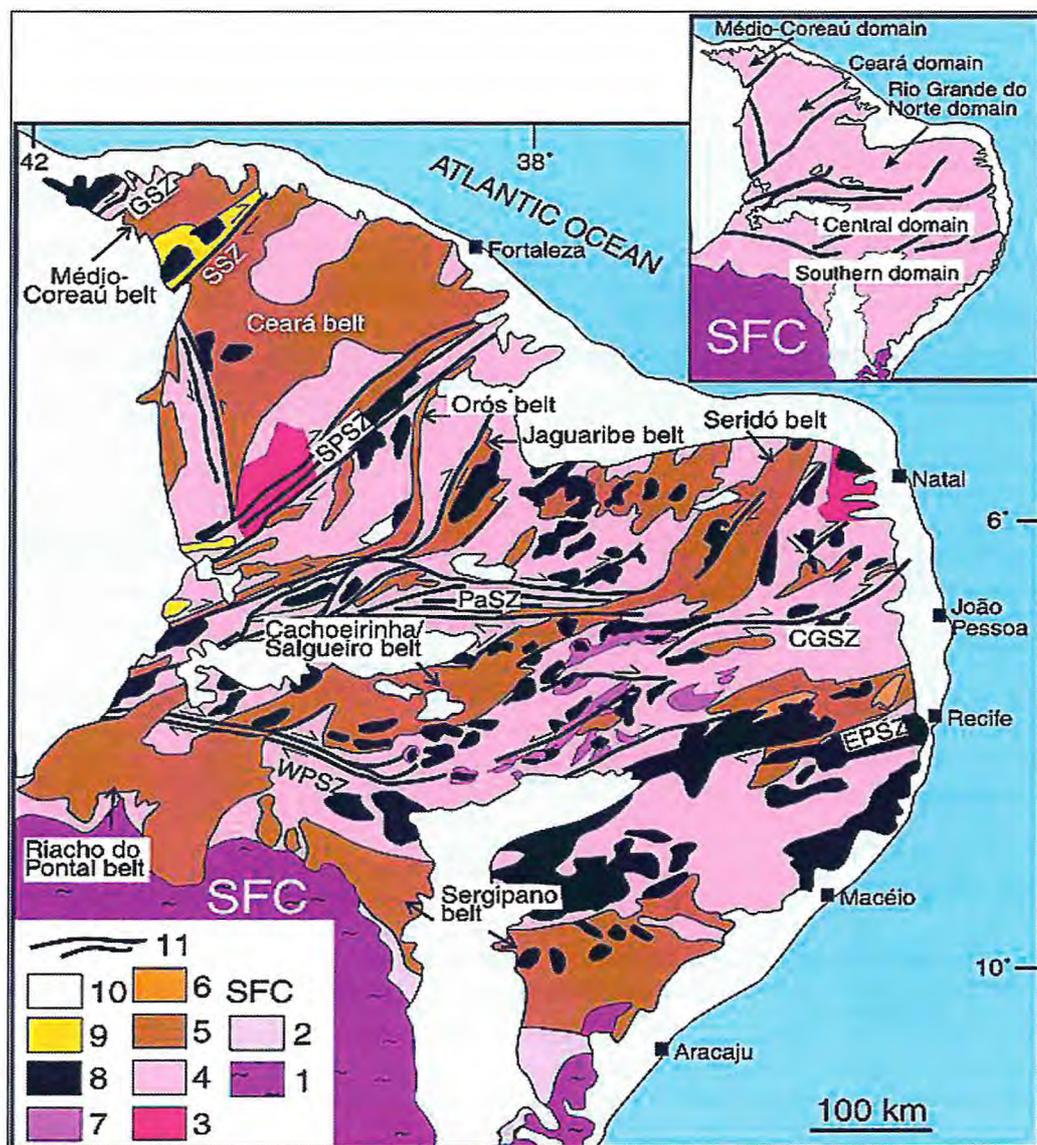
O município de Santa Quitéria encontra-se inserido geologicamente nos terrenos antigos do pré-cambriano da porção oriental da Plataforma Sul-Americana, no escudo Atlântico, mais precisamente na porção setentrional da Província Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977).

2.1 Província Borborema

A porção noroeste da Província Borborema tem sido alvo de diversos trabalhos envolvendo estudos geológicos, geocronológicos e de geotecnologias (FETTER, 1999; MARTINS, 2000; CAVALCANTE *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2004; CASTRO, 2004; TEIXEIRA, 2005). Sua evolução está relacionada à convergência e aglutinação dos crátons Oeste-Africano, Amazônico e São Francisco-Congo, durante a formação da porção ocidental de Gondwana, representados em geral por um sistema de *nappes* com metamorfismo inverso e sequências máficas/ultramáficas geradas em zonas de subducção (CABY & ARTHAUD, 1986).

Brito Neves (2000) dividiu a Província Borborema em 5 Domínios Tectônicos principais denominados de Médio Coreaú (localizado a norte do Lineamento Transbrasiliano e a sul da margem retrabalhada do Cráton São Luís); Ceará Central (localizado entre os lineamentos Transbrasiliano e Senador Pompeu); Rio Grande do Norte (localizado entre os Lineamentos Senador Pompeu e Patos); Zona Transversal (situado entre o Lineamento Patos e Pernambuco); e Tectônico Meridional (situado entre o Lineamento Pernambuco e a borda norte do Cráton São Francisco) (Figura 3). O Domínio Estrutural Central foi subdividido em quatro subdomínios: o Ceará Central; o Seridó, ao norte; o Cachoeirinha-Salgueiro e Riacho do Pontal, ao sul. Porém, somente o subdomínio Ceará Central será dado ênfase por englobar a região, objeto de estudo, desta forma será o único abordado nos itens subsequentes.

Figura 4 – mapa esquemático mostrando as principais unidades geológicas, plutons e zonas de cisalhamento da Província Borborema. As definições de legenda são as seguintes: 1 - Cráton de São Francisco; 2 - seqüências de cobertura do cráton; 3 – Embasamento Arqueano; 4 – Transamazonico e embasamento indiferenciado; 5 - cinturões supracrustais; 6 - 1,7-1,5 Ga ortognaisses e meta-anortositos; 7 – Ortognaisses do Cariri Velho; 8 - plutons do Brasiliano; 9 - grabens molássicos; 10 - cobertura Fanerozoica; 11 - principais zonas de cisalhamento transcorrentes, que são CGSZ, Campina Grande; PaSZ, Patos; EPSZ e WPSZ, Pernambuco Oriental e Pernambuco Oeste, respectivamente; GSZ, Granja; SPSZ, Senador Pompeu; E SSZ, Sobral.



Fonte: Neves, S. P (2003)

2.1.1 Domínio Ceará Central

2.1.1.1 Embasamento Arqueano

Os terrenos arqueanos do Ceará Central estão limitados na porção sul/sudeste, na região de Pedra Branca e Mombaça. Abrangem uma área de aproximadamente 6.000km², representando pequenos núcleos arqueanos (gnaisses granulíticos do tipo TTG) envolvidos por complexos gnáissicos paleoproterozoicos, e são distribuídos ao longo da borda ocidental da zona de cisalhamento Senador Pompeu.

As rochas arqueanas do Domínio Ceará Central são componentes do maciço Troia-Pedra Branca, representadas por terrenos gnáissico-granulíticos limitados pelas zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Sabonete-Inharé (Complexo Mombaça), compostos principalmente por rochas gnáissicas e granulíticas de composição tonalítica e granodiorítica.

2.1.1.2 Terrenos Acrescionários do Paleoproterozoico

Os terrenos do paleoproterozoico são marcados por grandes extensões intracratônicas que precederam um evento orogênético. Tais extensões estão registradas pela formação de uma sequência de rochas supracrustais metaígneas a oeste da cidade de Quixeramobim, formando o cinturão homônimo (ARTHAUD *et al*, 1998).

As rochas que constituem esta sequência basal margeiam a porção norte do núcleo arqueano e afloram desde a região de Madalena até Choró, sendo representadas por gnaisses de composição quartzo-diorítica a tonalítica e por terrenos do tipo TTG (tonalitos-tronjhemitos-granodioritos). São constituídos por rochas metaplutônicas intercaladas em faixas supracrustais (Suíte Metamórfica Algodões-Choró, de MARTINS, 2000).

Este domínio é caracterizado por uma extensiva tectônica horizontal, com o *emplacement* de “*nappes*” sendo uma constante regional. Essa tectônica envolve ainda, o retrabalhamento do embasamento arqueano e metassedimentos do proterozoico (CABY & ARTHAUD 1986). As relações geométricas e estruturais segundo os autores citados permitem de certa maneira distinguir reativações do embasamento arqueano anatético recobrimdo unidades do Proterozoico ao Norte e “*nappes*” de rochas proterozoicas de grau elevado com uma aparência de metamorfismo inverso recobrimdo suavemente rochas arqueanas reativadas ao Sul.

2.1.1.3 Cobertura Neoproterozoica

O Domínio Ceará Central é caracterizado pela abundância de ocorrências isoladas de sequências supracrustais, que bordejam núcleos anatóticos, como por exemplo: o Complexo Tamboril-Santa Quitéria, na região de Santa Quitéria. Essas unidades foram incluídas no chamado Grupo Ceará por Kegel (1956), ou Complexo Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), individualizadas como unidades metassedimentares, tais como; Independência, Canindé, Quixeramobim e Forquilha.

A sequência supracrustal neoproterozoica, representada aqui pelo Complexo Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), é caracterizada pela ocorrência de rochas pelíticas a semi-pelíticas, mica xistos e paragnaises da unidade Independência, e gnaisses em nível distinto de metamorfismo e migmatização, incluindo mármores, cálcio silicáticas, metagabros, anfíbolitos e dioritos da unidade Canindé, distribuídos em praticamente toda extensão da área.

Na região de Independência (CE), Caby & Arthaud (1986) reconheceram uma zonação metamórfica do tipo barrovia invertida em grandes *nappes* no estilo Himalaiano. Ainda segundo esses autores, nessa região o sentido de transporte das estruturas relacionadas à tectônica de baixo ângulo é para Sul.

2.1.1.4 Arco Magmático Santa Quitéria

O arco magmático de Santa Quitéria, localizado no setor NW da área e que representa o complexo granítico-migmatítico Neoproterozoico, é formado essencialmente por migmatitos de composição tonalítica a granítica, envolvendo granitóides neoproterozoicos a ordovicianos intrusivos de composição monzogranítica a sienítica (AMARAL, 2011). Representa o complexo granítico-migmatítico Neoproterozoico (Complexo Tamboril Santa Quitéria de FETTER *et al.*, 2003), localiza-se a leste da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II. O Arco Magmático Santa Quitéria compreende uma associação litológica diversificada incluindo gabros, tonalitos, granodioritos, monzogranitos e granitos. As rochas granitóides são equigranulares a megaporfíricas, maciças a foliadas. As foliações são associadas às fases de empurrão e transcorrência tardia. Enclaves microgranulares máficos são comuns e indicam a complexa evolução cíclica do arco com a alternância de fases de distensão e compressão. A história evolutiva culmina com a intrusão de granitos tardios equivalentes aos granitos pós-tectônicos do Domínio Médio Coreaú. Amplas áreas de migmatitos são resultantes da intrusão e fusão parcial de rochas graníticas mais antigas por pulsos magmáticos mais novos. O arco é flanqueado por metassedimentos (turbiditos, rochas cálcio-silicatadas e vulcanoclásticas) e

metavulcânicas de ambiente pré-arco ou pós-arco. Dados U-Pb indicam idades entre 665 e 622 Ma (FETTER *et al.*, 2003).

2.2 Mineralização Itataia

A província fósforo-uranífera de Itataia está localizada no município de Santa Quitéria-CE, porção central do Estado, englobada no Domínio Ceará Central. Os primeiros estudos geológicos enfocando a área de Itataia datam do início da década de 1980, merecendo destaque os trabalhos de Mendonça *et al.* (1980 e 1983). Mendonça *et al.* (1980) reconheceram uma espessa sequência metassedimentar de natureza transgressiva, com rochas migmatíticas, quartzíticas e gnáissicas sendo capeadas por metacalcários cristalinos. Posteriormente Mendonça *et al.* (1983), em um estudo de regionalização, denominaram de Grupo Itataia a sequência metassedimentar anteriormente reconhecida (Tabela 2).

Tabela 2: Esquema da estratigrafia da área de estudo.

ESQUEMA ESTRATIGRÁFICO	
QUATERNÁRIO	Aluviões e Terraços fluviais – sedimentos conglomeráticos, arenosos e argilosos inconsolidados.
JURÁSSICO	Diques Básicos – diabásios.
CAMBRO-ORDOVICIAANO	Evento Itataia – minério de colofanito.
NEOPROTEROZOICO (Ciclo Brasileiro)	Complexo Santa Quitéria – migmatitos e granitoides; Estrutura Circular de Morrinhos – granitos pós-tectônicos; granitos filoneanos; pegmatitos.
PALEOPROTEROZOICO (Ciclo Transamazônico)	Grupo Itatia Formação Alcântil – mármore e calcissilicáticas; Formação Barrigas – gnaisses e migmatitos; Formação Laranjeiras – quartzitos; Formação Serra do Céu – migmatitos, leptitos, gnaisses e anfíbolitos.

Fonte: Rosa Jr. *et al.*, 2015.

O depósito de Itataia apresenta 142.500 t de U_3O_8 (64% desse total são classificados como medido) e cerca de 18.000.000 t de P_2O_5 . O colofanito exhibe teores médios de P_2O_5 e U_3O_8 igual a 26,35% e 0,19%, respectivamente. Segundo Castro *et al.*, (2005), o depósito fósforo-uranífero é composto por colofanito que ocorre sob diferentes formas e associações, concentrando-se preferencialmente em mármore e rochas cálcio-silicáticas da Formação Alcantil. Os dividiu em 5 tipos de minério, que, segundo a importância econômica compreendem: (a) colofanito maciço situado especialmente no topo da seqüência de mármore e que sustenta pequena elevação associada a mármore brechados; (b) associado a brechas carbonosas e não carbonosas; (c) veios de pequena espessura que cortam mármore e a foliação milonítica; (d) disseminado em pegmatitos e (e) disseminado em gnaisses pelíticos e calcissilicáticos deformados e acompanhando o bandamento ou a foliação milonítica.

Castro *et al.* (2005) propõem um modelo para a mineralização fósforouranífera onde a sua origem estaria relacionada a rochas sedimentares depositadas em zonas de plataforma marinha rasa e/ou restrita e que o fosfato seria originalmente oriundo do reservatório oceânico. Já a fonte do urânio, seria predominantemente terrígena, relacionada a lixiviação do embasamento continental preexistente e se depositaria em ambiente marinho confinado com fortes influências continentais. Analisando a composição isotópica e química do minério e mármore e rochas cálcio-silicáticas associados à mineralização, os autores interpretaram que a interação entre esses fluidos pode ter ocorrido durante um estágio pós-deformacional. Desse modo, de acordo com o modelo proposto, a mineralização seria de origem predominantemente sedimentar, com reconcentração por processos tectono-metamórficos e posterior enriquecimento por processos supergênicos.

Considerando os estudos conduzidos por VERISSIMO *et al.* (2017), três grandes eventos de mineralização podem ser identificados em Itataia: (1) um evento inicial de alta temperatura conectado com um metassomatismo sódico rico em urânio, acontecendo na província Borborema e na parte africana; (2) um estágio secundário de baixa temperatura, consistindo em um evento multifásico cataclástico/hidrotermal limitado à falhas e zonas paleocársticas; (3) um terceiro e último evento, desenvolvido em condições oxidantes. Os dois últimos envolvem mistura de fluidos hidrotermais e meteóricos

Figura 5 – Blocos de mármore pertencente à Formação Alcantil, formação essa que foi utilizada nas medições em campo.



Fonte: Autor

Figura 6 – Afloramento da formação Barrigas com silimanita-granada-biotita xisto, com *strike* da camada medindo 195 e mergulhando para NW. Há intercalação com metarcósio de coloração acinzentada.



Fonte: Autor

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

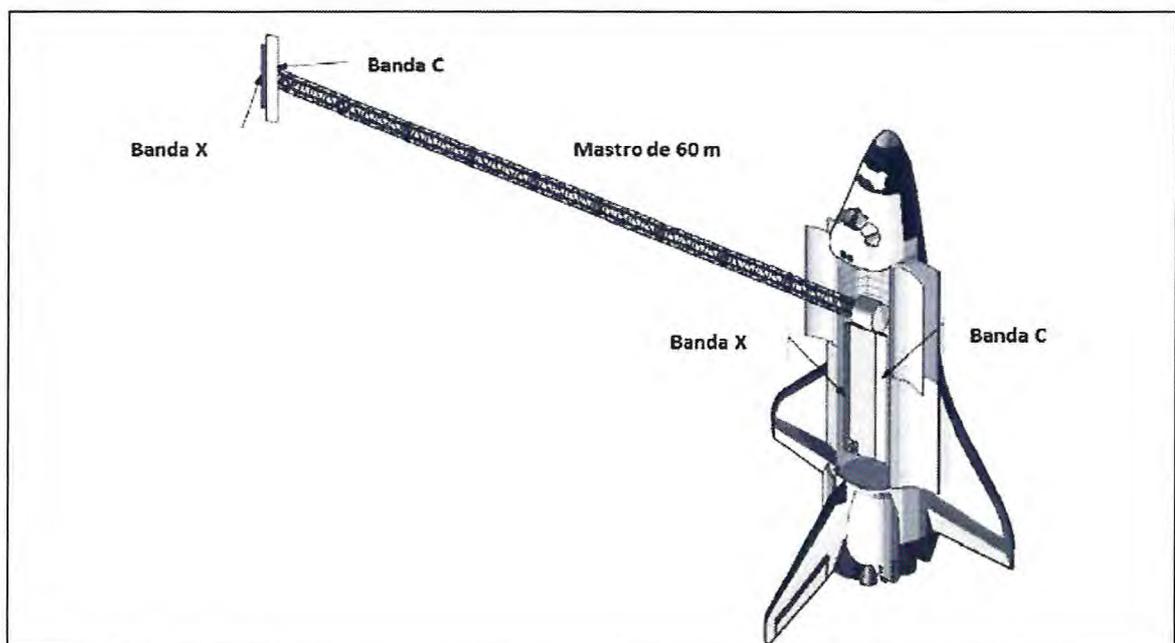
3.1.1 Dados de Sensoriamento Remoto

Neste trabalho foi empregado o modelo digital de elevação da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que foi um projeto de cooperação entre *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e das agências espaciais Alemã e Italiana. Esse projeto gerou um Modelo Digital de Elevação (MDE) quase global, que recobre as áreas continentais localizadas entre as latitudes 60°N e 56°S, o que corresponde a aproximadamente 80% do total de massas terrestres (NASA, 2013).

Todos os dados dessa missão foram coletados em 11 dias, pois o sistema de radar usado escaneava ativamente a superfície da Terra, independente da escuridão ou cobertura de nuvens (RABUS *et al.*, 2003).

Nessa missão foi usado o instrumento Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) a bordo do ônibus espacial Endeavour. Os canais principais de transmissão e recepção das bandas C e X foram posicionados na área de carga do ônibus espacial, enquanto as antenas secundárias (receptoras) foram colocadas em um mastro retrátil de 60 m de comprimento (FARR *et al.*, 2000) (Figura 5)

Figura 5 - Segmento espacial do SRTM, mostrando os principais componentes do Radar de Abertura Sintética (SAR)



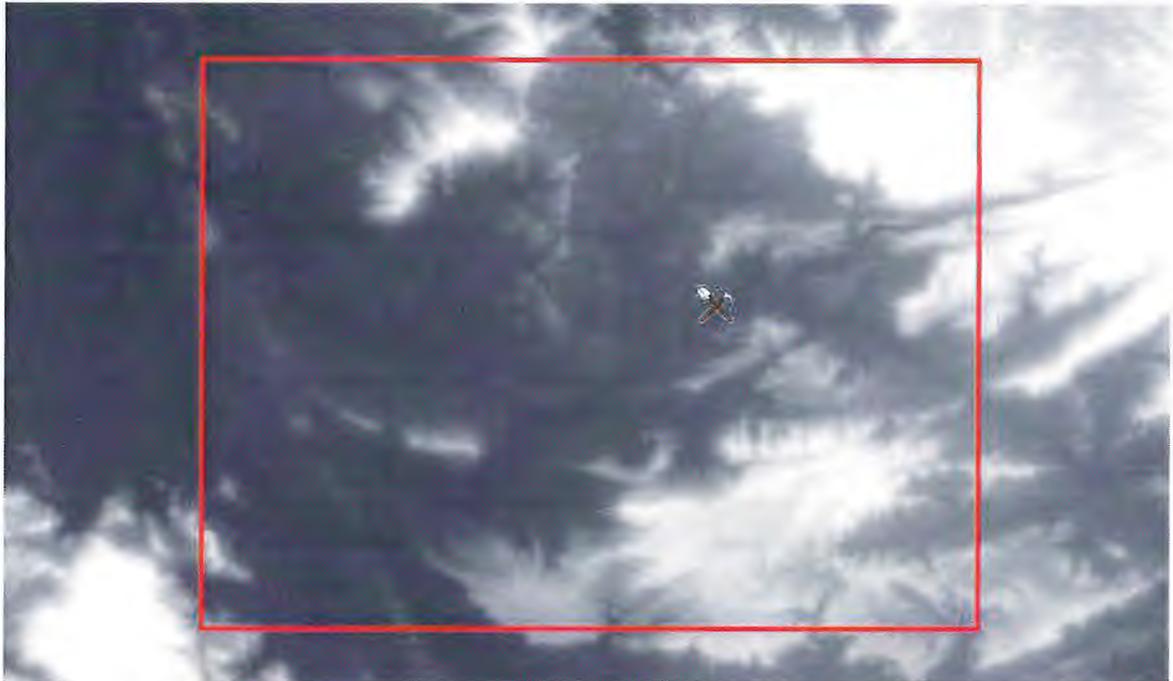
Fonte: RABUS *et al.*(2003).

Nesse sistema, os pulsos do radar transmitidos pela antena convencional do SAR são recebidos pelo receptor SAR convencional e pelo receptor adicional instalado no mastro acoplado ao ônibus espacial. Ao combinar de forma coerente os sinais dos dois receptores, a diferença de fase entre os sinais pode ser estimada, sendo que essa diferença de fase está relacionada com a altitude do ponto (ROSEN *et al.*, 2000).

A versão NASA 3.0 SRTM (SRTM Plus), utilizada nesse trabalho, inclui dados topográficos de fontes externas, os quais foram utilizados para preencher lacunas existentes nas versões anteriores dos dados SRTM. Os principais dados de preenchimento são provenientes do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), que produz um modelo digital de elevação a partir de pares estereoscópicos. A segunda fonte de dados utilizadas no preenchimento é o *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data* (GMTED2010), o qual possui menor resolução e é derivado de diversas fontes (NASA, 2013).

Segundo Rabus *et al.* (2003), O MDE SRTM+ apresenta precisão vertical absoluta de $\pm 16\text{m}$ e relativa de $\pm 10\text{m}$, com resolução espacial de 1 arco-segundo, aproximadamente cerca de 30m de resolução espacial (Figura 5). Lopes *et al.* (2017) observaram que o MDE mais indicado para a extração automática de lineamentos é o SRTM+, pois o mesmo não ignora altitudes, como o ASTER GDEM 2. Em relação ao TOPODATA, ele não é o mais indicado, mas ainda assim pode ser usado, pois não possui tantos problemas estatísticos com altitudes, somente em territórios onde a variação de altitude é baixa, não caracterizando ambiente possível de geração de lineamentos estruturais, uma vez que já se trata de um modelo gerado por interpolação matemática. Numa escala de eficiência para a extração automática de lineamentos, o SRTM+ seria o melhor, seguido do TOPODATA, enquanto o ASTER GDEM 2 não possui uma boa efetividade para tal (LOPES *et al.*, 2017)

Figura 7 - Imagem SRTM+ cena ponto 63 orbita 217 recortada para a área de estudo.



Fonte: *USGS Earthexplorer*

3.1.2 Softwares

Os *softwares* utilizados foram:

- ArcMap 10.2.2: fusão dos *hillshades* gerados; traçado manual dos lineamentos; montagem do banco de dados, confecção dos mapas temáticos.
- Geomatica 2016: extração automática dos lineamentos
- Global Mapper 2016: geração dos *Hillshades*
- RockWorks 16: geração dos diagramas de rosetas

3.1.3 Dados geológicos

Uma visita técnica ao campo possibilitou o reconhecimento e a medição da foliação dos litotipos da região, que foram efetuadas em afloramentos das formações Alcantil, Barrigas e Laranjeiras

3.2 Métodos

3.2.1 Processamento Digital de Imagens (PDI)

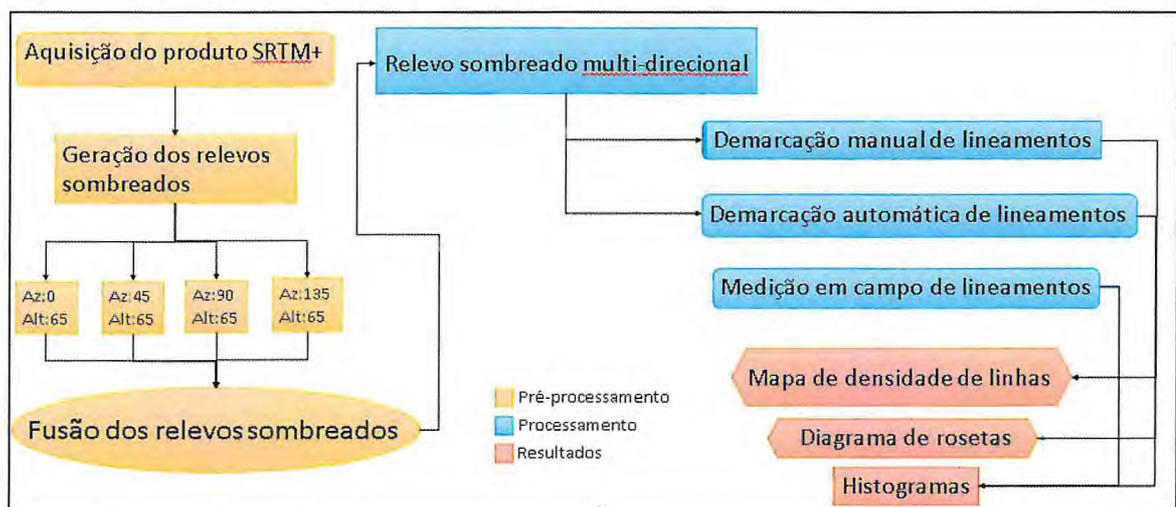
Existem várias definições no que se diz respeito ao sensoriamento remoto. Novo em 2008, propôs uma definição que engloba todo o conceito que deve ser entendido sobre o que é sensoriamento remoto, quando do ponto de vista do usuário de imagens de satélite:

“Sensoriamento remoto consiste na utilização conjunta de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas ou espaciais) para carregar tais instrumentos e equipamentos, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas mais diversas manifestações. ”

A partir dessa definição o uso do termo sensoriamento remoto fica restrito que objeto imageado deva ser registrado por meio de medições da radiação eletromagnética, tal como a luz solar refletida da superfície de qualquer objeto. Nenhum outro tipo de sensor que obtenha imagens que não seja pela detecção eletromagnética deve ser classificado como sensoriamento remoto (MENESES & ALMEIDA, 2012). Com essa afirmação é comum considerar como sensoriamento remoto as imagens obtidas de satélites.

O processamento de imagens digitais é a etapa pós aquisição realizada pelo sensor, onde serão tratados os dados obtidos afim de realçar alvos de interesse. Para isso são necessárias técnicas de pré-processamento e processamento. A seguir serão apresentadas as técnicas usadas nesse trabalho (Figura 6).

Figura 8 - Fluxograma da metodologia utilizada



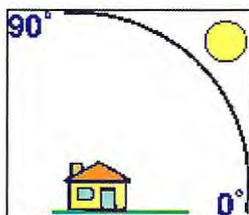
Fonte: Autor

Relevo sombreado

Mapas de relevo sombreado são uma representação 3D em tons de cinza da superfície, com a posição relativa do sol levada em conta para sombreadar a imagem. A geração de mapas de relevo sombreado depende dos parâmetros altitude e azimute.

As propriedades de altitude e azimute indicam a posição relativa em que o sol estará para a criação do relevo sombreado. Altitude é o ângulo de elevação do sol sobre o horizonte e vai de 0 a 90 graus (Figura 8). Um valor de 0 graus indica que o sol está no horizonte, isto é, no mesmo plano horizontal da referência. Um valor de 90 graus indica que o sol está exatamente sobre a cabeça, gerando nenhuma sombra. Azimute, por sua vez, é a posição do sol ao longo do horizonte. Essa posição é indicada pelo ângulo do sol medido no sentido horário vindo do Norte. Um azimute de 0 graus indica Norte, Leste é 90 graus, Sul igual 180 e Oeste é igual 270 graus.

Figura 9 - Desenho esquemático demonstrando como funciona a altitude solar na geração de mapas de relevo sombreado



Fonte: ArcGIS Help 10.2

Aritmética de imagens

Aritmética de imagens é uma das mais simples formulações algorítmicas de processamento de imagens e que pode ter resultados expressivos. É um processo bastante rápido para ajustar e suavizar imagens com muito ruídos ou para se obter realces de toda a área de uma imagem ou de alvos específicos de interesse do analista. As operações aritméticas (soma, multiplicação, subtração e divisão) são uma forma de recurso para reduzir o número de imagens, o que é uma vantagem em termos de armazenamento em disco. (MENESES & ALMEIDA, 2012).

A divisão ou razão entre imagens é uma operação muito comum do PDI de sensores remotos. Ela funciona como meio para destacar sutis variações de reflectância de alvos específicos (litologias, solos, vegetação, entre outros) em uma mesma cena. A divisão de imagens consiste na divisão de pixel de uma imagem pelo pixel de posição correspondente de outra imagem

Lineamentos

O termo lineamento vem sendo usado recentemente e frequentemente com diferentes tipos de significado. O alinhamento linear de feições em fotos e imagens, são das mais obvias

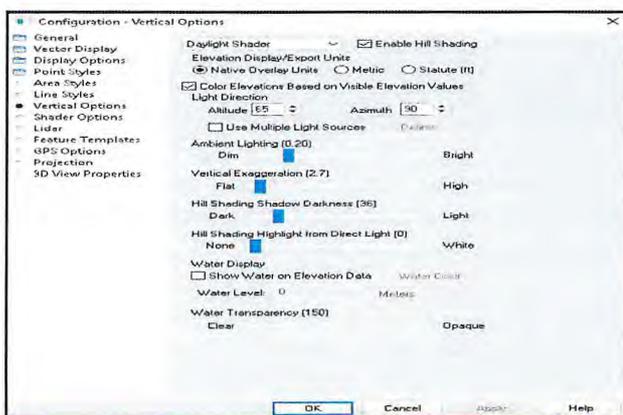
feições em imagens aéreas e, por causa disso, o uso do termo lineamento na literatura geológica proliferou. Hobbs em 1904 usou pela primeira vez o termo lineamento para definir uma significativa linha do relevo, a qual revela a arquitetura oculta do embasamento rochoso (Fonte, ano). O'LEARY *et al.* (1976) revisou o uso do termo e definiu lineamento essencialmente em um sentido geomorfológico, como sendo feições lineares de uma superfície, mapeável, simples ou composta, cujas partes encontram-se alinhadas de forma retilínea ou ligeiramente curva, que diferem das feições adjacentes e refletem provavelmente estruturas de subsuperfície.

A manifestação de um lineamento é dependente da escala de observação e dimensões envolvidas. Lineamentos de uma certa dimensão e forma podem ser mais claros numa certa escala, como feições tectônicas do tamanho de centenas de quilômetros precisam ser estudadas em imagens de escala menor. Em uma imagem, os lineamentos podem ser facilmente identificados por interpretação visual utilizando tom, cor, textura, padrão, associação, entre outros. Por outro lado, técnicas digitais automatizadas de detecção de bordas também podem ser aplicadas na detecção de lineamentos. A interpretação visual de lineamentos envolve um certo grau de subjetividade e os resultados podem variar de pessoa para pessoa.

4. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Para se extrair os lineamentos manualmente e automaticamente, foi necessária uma rotina de procedimentos computacionais. Primeiro foi necessário fazer o *download* da imagem SRTM Plus no site *Earth Explorer*. A marcação dos lineamentos estruturais foi feita por meio de imagens de relevo sombreado geradas utilizando a metodologia de Brown (2014) a partir da configuração de determinadas geometrias de iluminação solar (Figura 9).

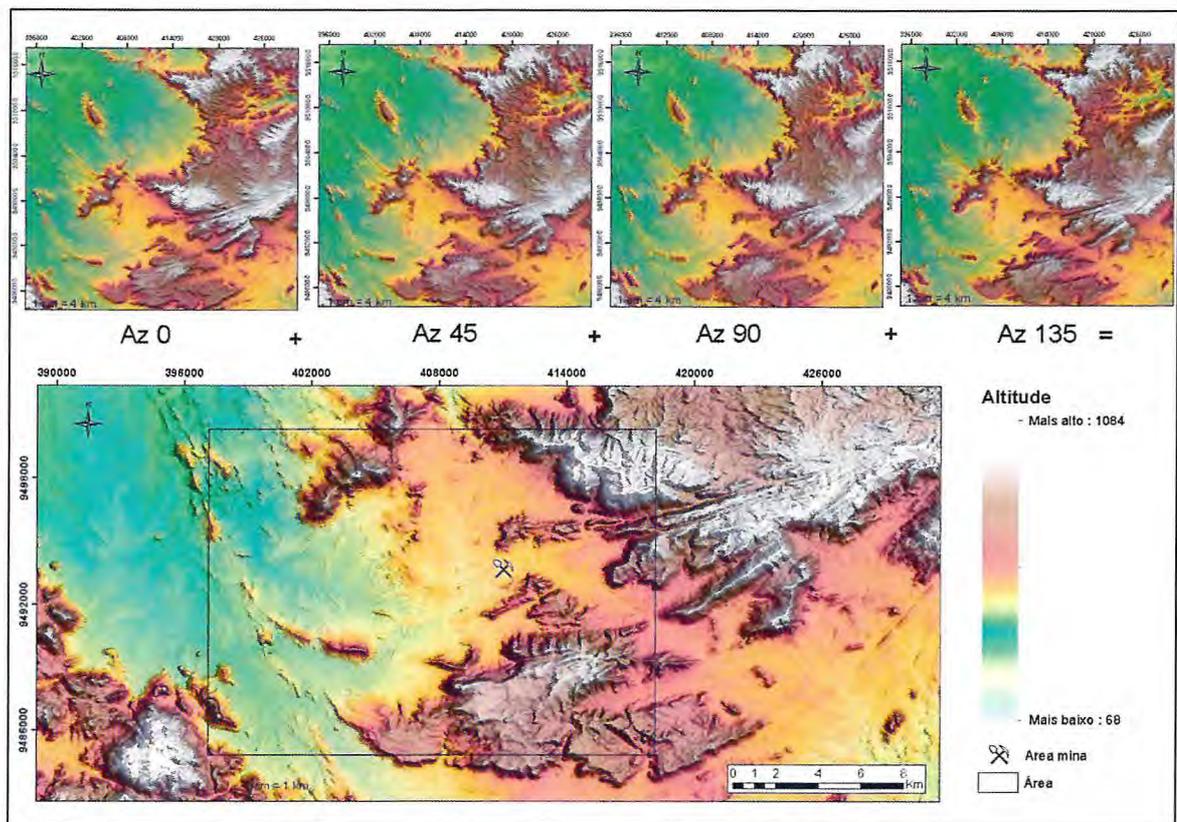
Figura 10 - Tela de input da configuração das opções verticais no *software* Global Mapper para a geração das imagens de relevo sombreado de acordo com a metodologia de Brown (2015)



Fonte: *Global Mapper 16*

Utilizou-se a fusão de imagens de relevo sombreado geradas com ângulo de iluminação 0°, 45°, 90°, 135°, para um melhor evidenciamento da morfologia do local, mantendo-se o ângulo de elevação solar em 65°, adaptando assim as metodologias de Alhirmizy (2015) e Abdullah *et al.* (2010) (Figura 10).

Figura 11 - As quatro imagens de relevo sombreado geradas através do SRTM+, com iluminações solares 0°, 45°, 90°, 135° e elevação solar 65° e o resultado da fusão delas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

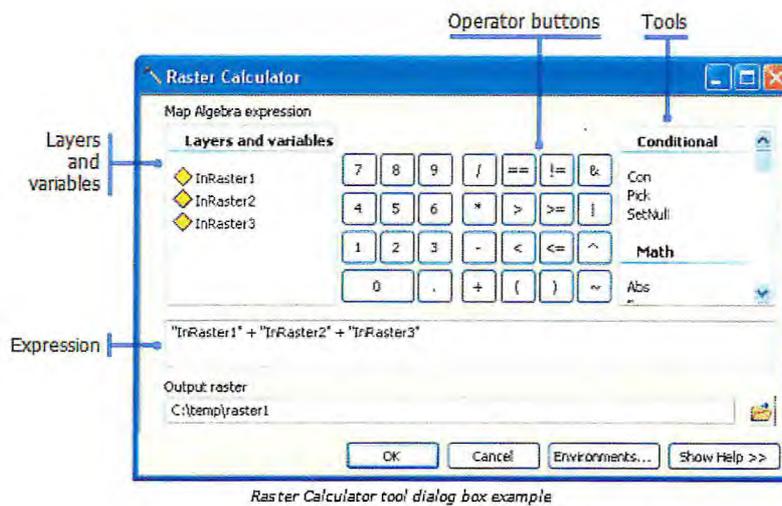
A fusão foi feita pela ferramenta *Raster Calculator* (Figura 11), onde foi realizada uma média aritmética entre as 4 imagens, resultando numa imagem onde se preservam as estruturas realçadas nas quatro imagens.

A equação aplicada foi:

$$\frac{(Az0 \text{ Alt}65 + Az45 \text{ Alt}65 + Az90 \text{ Alt}65 + Az135 \text{ Alt}65)}{4}$$

Onde “Az” corresponde ao Azimute Solar e “Alt” a Altitude Solar.

Figura 12 - Ilustração de como funciona o *Raster Calculator*, onde *InRaster 1, 2 e 3* são os Rasters de entrada, *Expression* onde foi aplicada a formula supracitada e *Output Raster* é a imagem resultada da fusão.



Fonte: ArcGIS 10.2.2 Help

Para comprovar a eficácia da aritmética utilizada, foi escolhido um ponto em comum às 4 imagens utilizadas no trabalho: azimute 0, 45, 90 e 135. Em seguida, utilizou-se a ferramenta *Add Surface Information* localizada em *3D Features > Functional Surface* no software ArcMap 10.2.2 de modo que se consiga extrair o valor do pixel do mesmo ponto nas quatro imagens (Tabela 3).

Tabela 3 – Valor do pixel no ponto pré-determinado nas quatro imagens com geometrias solares diferentes e na imagem resultante da média das imagens.

Azimute Solar	Altitude Solar	Valor do pixel no ponto
0	65	127.93
45	65	116.63
90	65	129.41
135	65	150.62
Média	65	131.14

Fonte: elaborado pelo autor

Com a fusão de imagens de relevo sombreado gerada, foram marcados manualmente os lineamentos e, em seguida, utilizou-se o software Geomatica 2016 para a geração dos

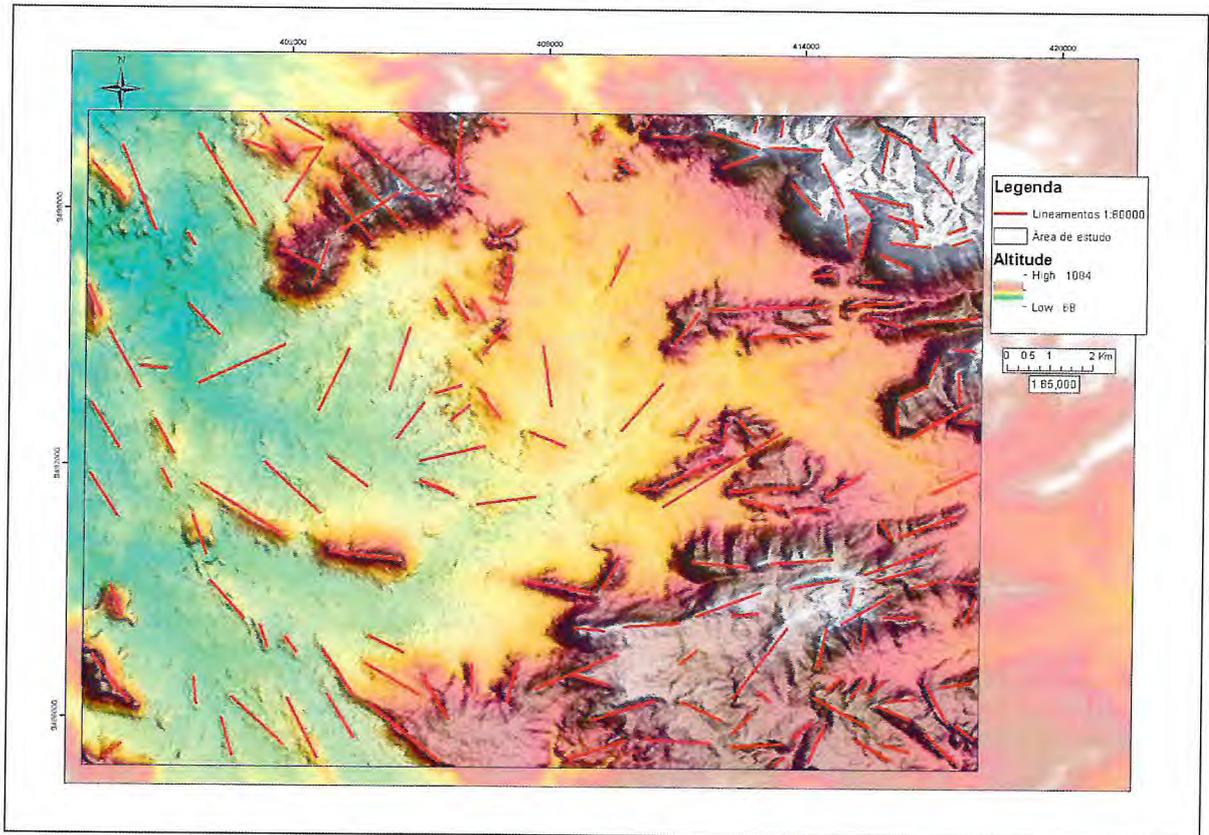
lineamentos de forma automática. Os lineamentos coletados em campo foram plotados e, em seguida, exportou-se os lineamentos gerados para o formato DXF, pois o *software* RockWorks 16 condiciona o uso deste formato e assim foi gerado o diagrama de roseta para a comparação final dos resultados. Os processos das 3 etapas (extração manual, automática e em campo) serão aprofundados nas devidas subseções.

4.1 Extração manual

Os lineamentos foram considerados na concepção de O'LEARY *et al.* (1976), como sendo feições lineares de uma superfície, mapeável, simples ou composta, cujas partes encontram-se alinhadas de forma retilínea ou ligeiramente curva, que diferem das feições adjacentes e refletem provavelmente estruturas de subsuperfície. Os lineamentos identificados na imagem de relevo sombreada multidirecional foram traçados diretamente no programa SIG *ArcMap 10.2.2*

Para identificação dos lineamentos da área estudada, foram adaptados os procedimentos propostos por LIU (1984). A análise dos lineamentos foi realizada com o uso da imagem de relevo sombreado multidirecional gerada através de imagens de satélite SRTM+. As imagens de relevo sombreado foram obtidas com 4 direções distintas de iluminações (0°, 45°, 90° e 135°), todas posicionadas a 65° de altitude solar (Figura 12).

Figura 13 – Mapa de lineamentos extraídos manualmente.

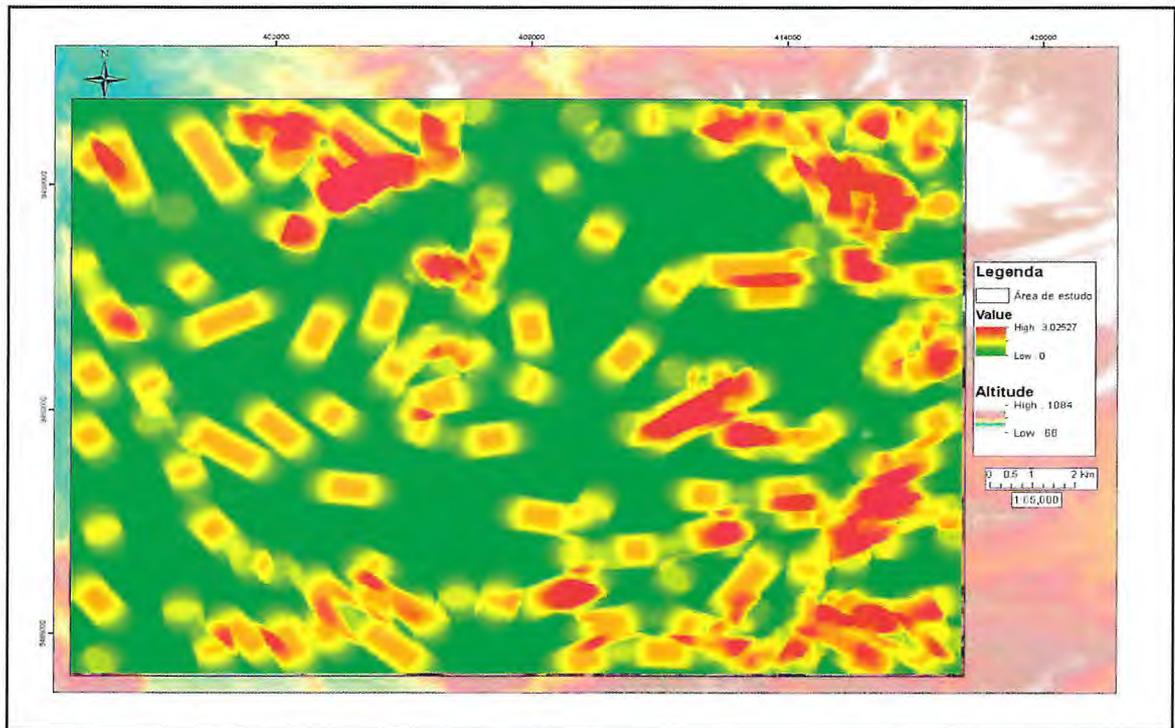


Fonte: Elaborado pelo autor

Foram traçados 189 lineamentos simples, de forma a facilitar a comparação com o método automático de extração. Os lineamentos variam de 1 a 3 quilômetros de extensão, concentrando-se nas porções noroeste, nordeste e sudeste da área, sendo representados pela Serra do Gavião, Serra do Céu e Serra da Mata Fome, respectivamente (Figura 12).

Foi gerado um mapa de densidade de linhas, pela ferramenta *Line density* do ArcMap para uma maior visualização das localidades de concentração dos lineamentos (Figura 13). A análise da densidade de lineamentos consiste na contagem do número de lineamentos contidos em cada célula do pixel ou no cálculo dos tamanhos das linhas contidas dentro de uma mesma célula.

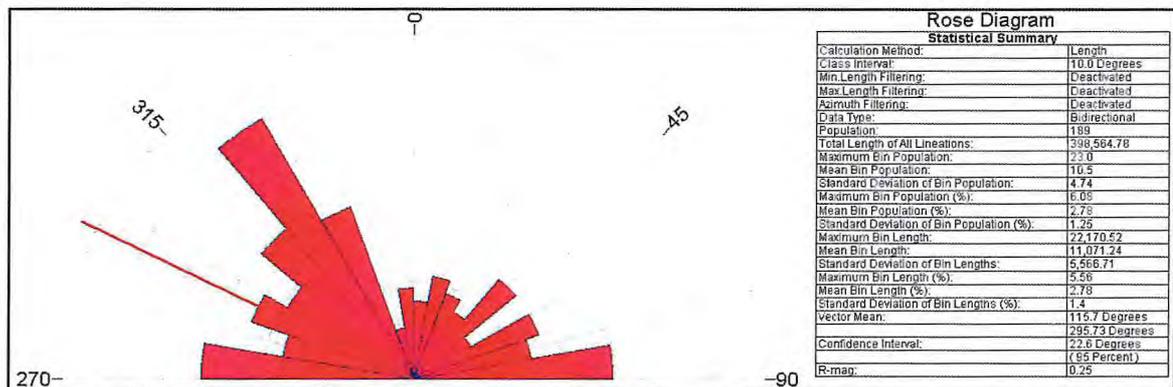
Figura 14 - Mapa de densidade de linhas extraídas manualmente.



Fonte: Autor

A orientação preferencial dos lineamentos traçados manualmente em ambiente SIG é NW-SE, como visto na Figura 14, onde a classe de orientação 320-330 é a com maior frequência, chegando aos 23 lineamentos. A população de lineamentos média para cada classe é de cerca de 10 lineamentos. O vetor que representa a média da orientação de todos os lineamentos tem a orientação 295° azimute, indicando que a orientação média dos lineamentos está enquadrada nos quadrantes NW-SE (Figura 14)

Figura 15 - Diagramas de roseta exibindo o azimute dos lineamentos extraídos manualmente.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Extração automática

O algoritmo de extração de lineamentos do *software* PCI Geomatica consiste em: Detecção de bordas, configuração de limiares e extração de curva. Para isso, existem seis parâmetros alteráveis em que se controla comprimentos, limites, filtros de detecção e ângulos para se extrair os lineamentos. Cada área responde diferentemente ao algoritmo, portanto recomenda-se que os parâmetros sejam ajustados à área de estudo (Figura 15). Os seis parâmetros controláveis do módulo LINE do PCI Geomatica 2016 são:

Filter Radius (FR): especifica o raio do filtro de detecção de borda, em pixels. Este parâmetro determina o nível até o qual o algoritmo detecta a informação como um lineamento. Um grande valor de *Filter Radius* indica que menos detalhes podem ser detectados, e também menos ruído. O valor padrão é 10, sendo que o intervalo de valores deste parâmetro é de 0 até 8192.

Edge Gradient Threshold (EGT): especifica o limite do nível de gradiente mínimo de um pixel de borda para obter uma imagem binária. Os pixels acima do limiar representarão na imagem binária um elemento de borda. Este valor deve estar na faixa de 0 a 255, sendo que o valor padrão é 100.

Curve Length Threshold (CLT): especifica o comprimento mínimo de curva, em pixels, para ser considerado como lineamento.

Line Fitting Error Threshold (LFET): especifica, em pixels, o erro máximo permitido ao sobrepor uma linha sobre uma curva. Os valores mais baixos proporcionam um melhor ajuste, mas também segmentos mais curtos na linha.

Angular Difference Threshold (ADT): especifica o ângulo máximo, em graus, entre segmentos de uma linha. Se o ângulo excede o máximo especificado, a linha é dividida em dois ou mais vetores. Este ângulo também define o ângulo máximo entre dois vetores para serem ligados. O valor padrão é 30.

Linking Distance Threshold (LDT): especifica a distância mínima, em pixels, entre os pontos finais de dois vetores para serem ligados. O valor padrão é de 20.

Figura 16 - Valores utilizados na extração de lineamentos por meio do algoritmo LINE.

Files	Input Params 1	Log
<input type="radio"/>	Filter Radius (Pixels)	10
<input type="radio"/>	Edge Gradient Threshold	50
<input type="radio"/>	Curve Length Threshold (Pixels)	15
<input type="radio"/>	Line Fitting Error Threshold (Pixels)	5
<input type="radio"/>	Angular Difference Threshold (Degrees)	30
<input type="radio"/>	Linking Distance Threshold (Pixels)	20

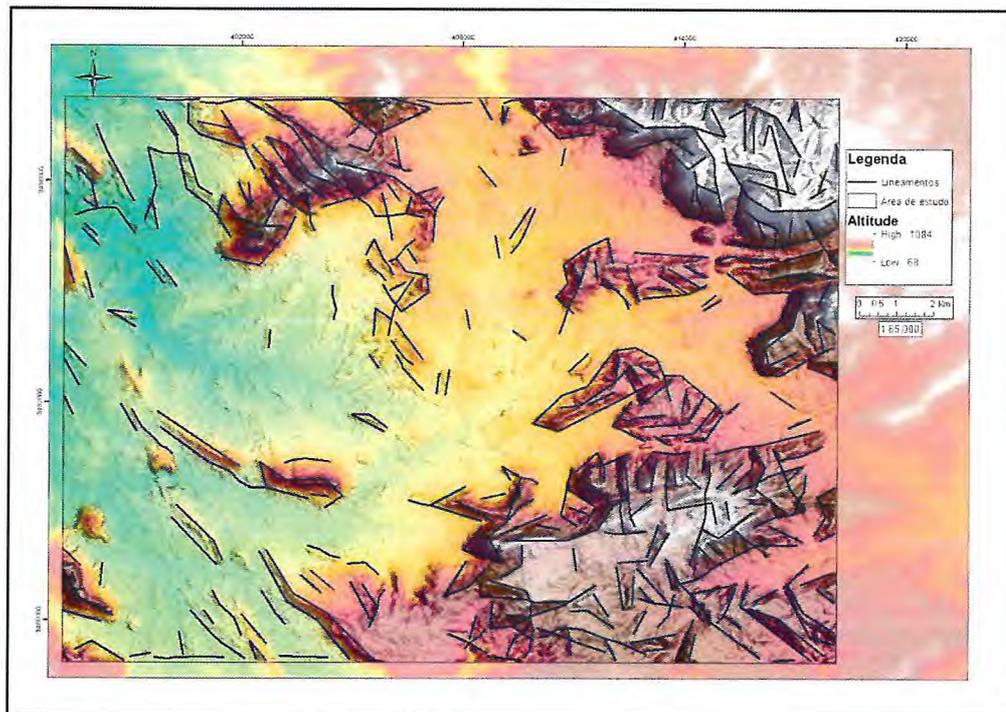
Fonte: Elaborado pelo autor

Neste trabalho os seguintes parâmetros foram modificados, a fim de se obter melhores resultados na extração dos lineamentos: *Edge Gradient Threshold* (EGT), *Curve Length Threshold* (CLT), *Line Fitting Error Threshold* (LFET). A diminuição no valor do EGT se deu pela necessidade de abaixar o limiar de demarcação de lineamentos em relação ao gradiente altimétrico, ou seja, era necessário que um menor gradiente altimétrico resultasse num lineamento marcado. A diminuição do CLT se deu por conta de a região apresentar planaltos residuais pouco curvilíneos, portanto abaixou-se o valor do limiar do tamanho de curva para se traçar o lineamento. O aumento de duas unidades no campo de LFET foi necessário por conta do alto número de lineamentos bastante curtos, então para remediar foram acrescentadas 2 unidades ao campo LFET. Não foram feitas alterações nos campos restantes pois os valores automáticos responderam bem para a área estudada.

Utilizando os parâmetros supracitados, foi gerado um arquivo vetorial em formato *shapefile* em formato de linha, contendo, ao todo, 388 linhas inseridas dentro da área de estudo (Figura 16).

Figura 17 - Mapa de lineamentos gerados automaticamente por meio do algoritmo LINE

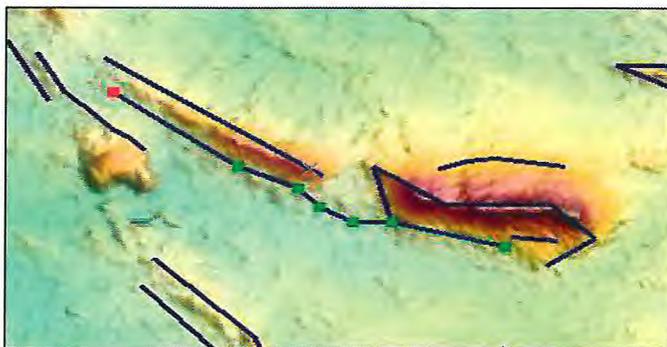
utilizando os parâmetros propostos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

As linhas geradas eram compostas, ou seja, eram linhas onde existiam mais de 2 vértices (início e fim da linha) (Figura 17). Para medidas comparativas, as linhas marcadas automaticamente precisavam ser simples, pois na extração manual foram extraídas apenas linhas simples. Então, para torna-las linhas simples, foi utilizado a ferramenta *Split lines at vértice* contida no ArcGIS 10.2.2.

Figura 18 - Demonstração de uma linha composta gerada pelo algoritmo LINE.

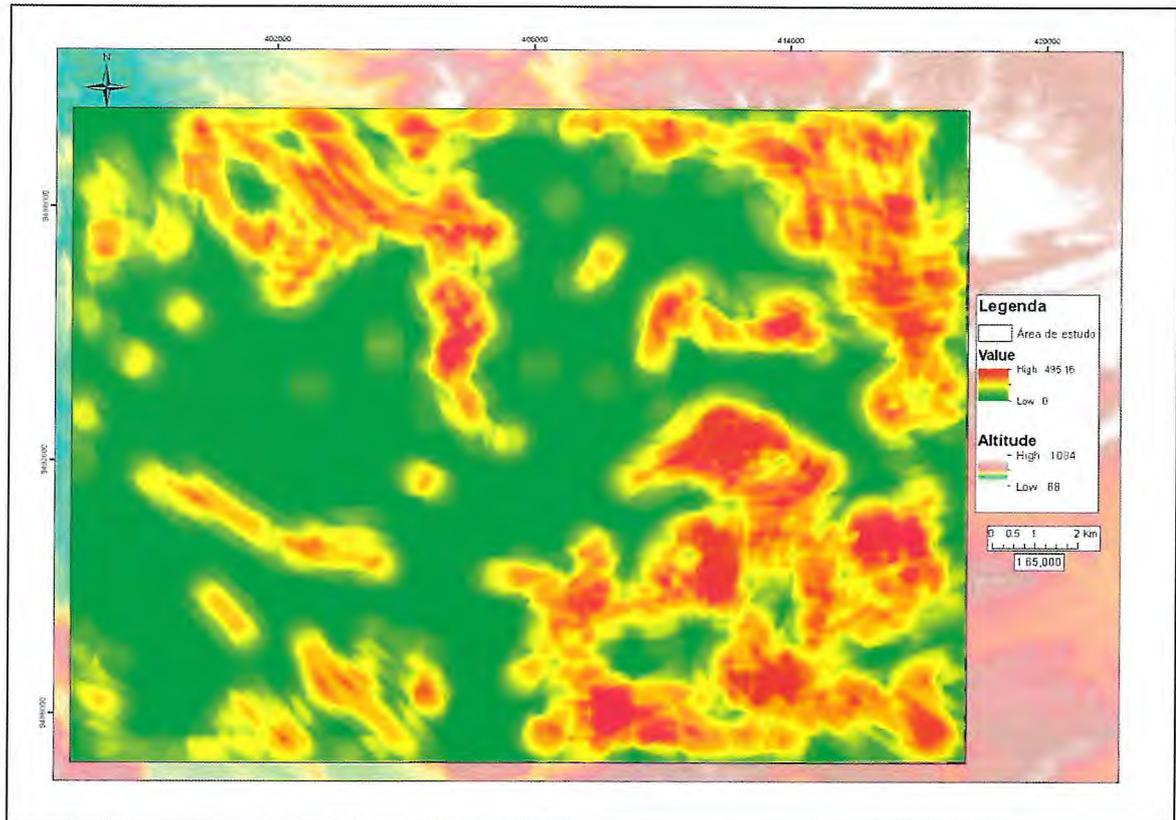


Fonte: Elaborado pelo autor

Foi gerado também um mapa de densidade de linhas (Figura 18) e, assim como no mapa de densidade de linhas traçadas manualmente, as regiões onde concentram-se os lineamentos

são nas porções noroeste, nordeste e sudeste da área, sendo representados pela Serra do Gavião, Serra do Céu e Serra da Mata Fome, respectivamente.

Figura 19 - Mapa de densidade de linhas da extração automática.



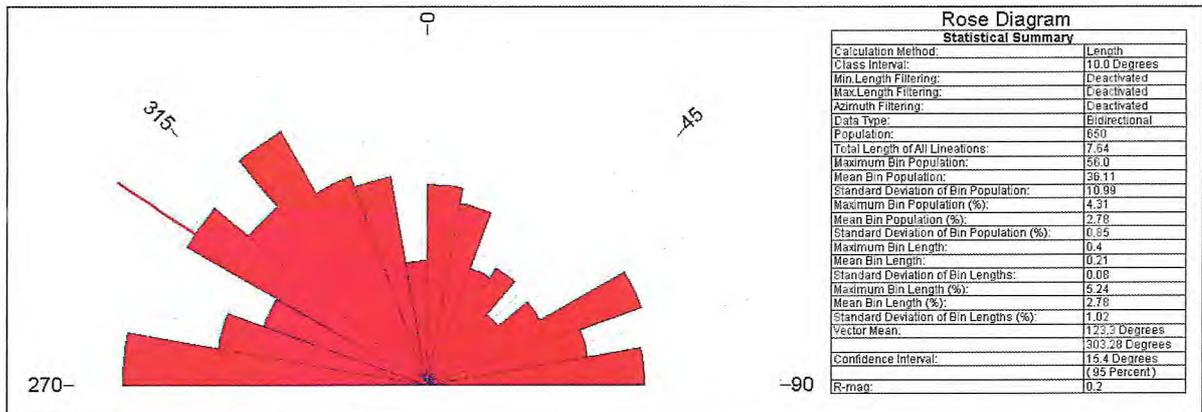
Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, foram criadas 4 colunas na tabela de atributos dos lineamentos: X1, Y1, X2, Y2, onde a coluna X1 e Y1 foi utilizada para calcular as coordenadas do vértice de início da linha e a coluna X2 e Y2 para calcular as coordenadas do vértice de fim da linha. Esse processo é importante pois são pelas coordenadas que o software RockWorks 16 faz sua geometria, como cálculo de azimuth e tamanho de linha.

No software RockWorks 16, foi gerado um diagrama de roseta baseado na frequência dos lineamentos e gerado um sumário estatístico (Figura 19). No sumário estatístico foram computados 650 lineamentos gerados automaticamente, resultantes do processo de correção da linha composta. A orientação preferencial dos lineamentos traçados automaticamente é NW, onde as classes de orientações 270-280, 290-300 e 320-330 se destacam. A população de lineamentos média para cada classe é de cerca de 10 lineamentos. O vetor que representa a

média da orientação de todos os lineamentos tem a orientação 303° azimute, indicando que a orientação média dos lineamentos está enquadrada nos quadrantes NW-SE (Figura 19).

Figura 20 - Diagrama de roseta para os lineamentos gerados automaticamente.

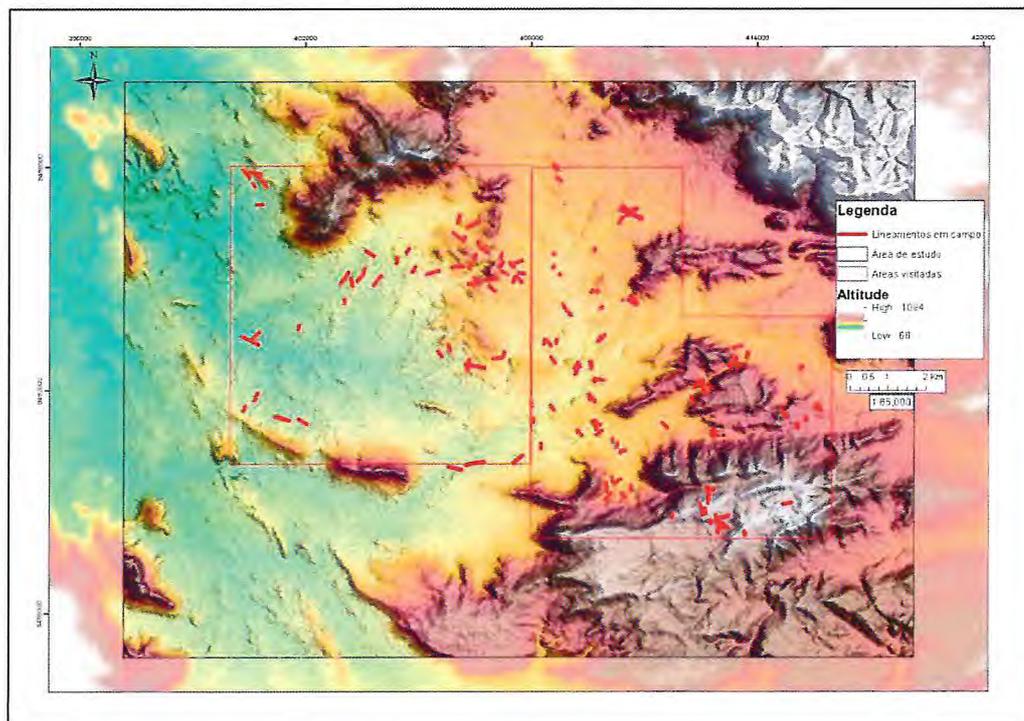


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Medição em campo

Foram coletadas 204 medidas em campo, sendo elas a medida de *strike* das fraturas e foliações das formações Alcantil, Barrigas e Laranjeiras. As medidas foram coletadas durante etapa de campo realizada entre os dias 25 de abril a 5 de maio de 2017. (Figura 20).

Figura 21 - mapa de lineamentos extraídos em campo

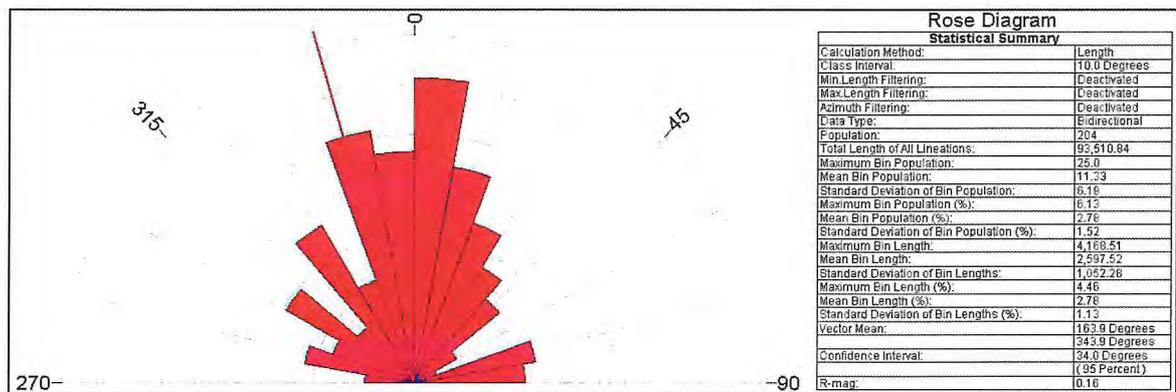


Fonte: Elaborado pelo autor

A área de medição das atitudes em campo foi delimitada aproveitando a demarcação de outras equipes de mapeamento presentes na área. Essas áreas continham 64km² cada, somando então 128km² de área de estudo em campo. Sendo assim, o autor acompanhava essas equipes com o intuito de medir as estruturas lineares in situ. Com as medidas de campo, foi gerado um mapa de linhas apenas para representar as estruturas medidas em campo, uma vez que elas foram medidas em forma de ponto. Por conta da impossibilidade da visualização de toda a extensão da estrutura linear em campo, tomou-se como medida comparativa, nesse caso, apenas a frequência das estruturas.

Na Figura 20 é possível perceber que as medidas tomadas em campo se concentraram mais na região central da área de estudo, diferentemente das medidas extraídas manualmente e automaticamente, onde as medidas se concentravam à noroeste, nordeste e sudeste. Essa impossibilidade se deu pelo difícil acesso da região, por ser uma região montanhosa.

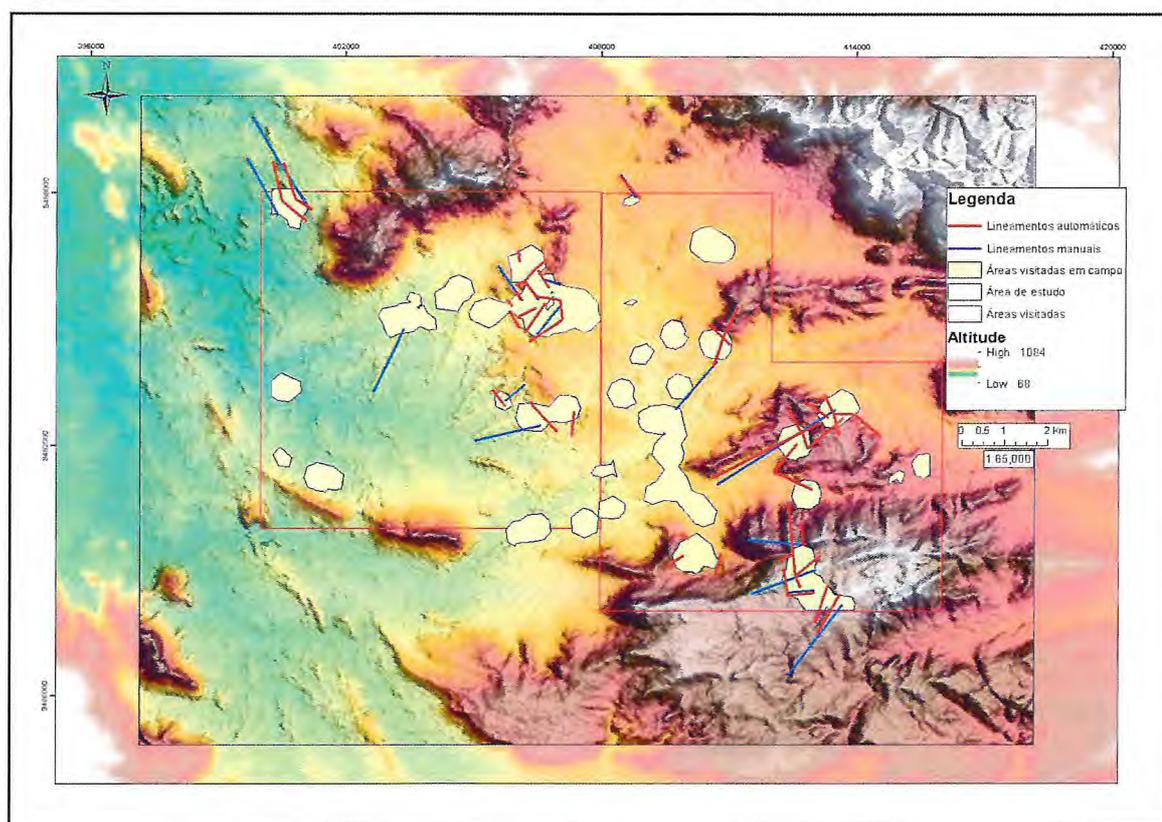
Figura 21 - Diagrama de roseta para os todas as atitudes extraídas em campo



Fonte: Elaborado pelo autor

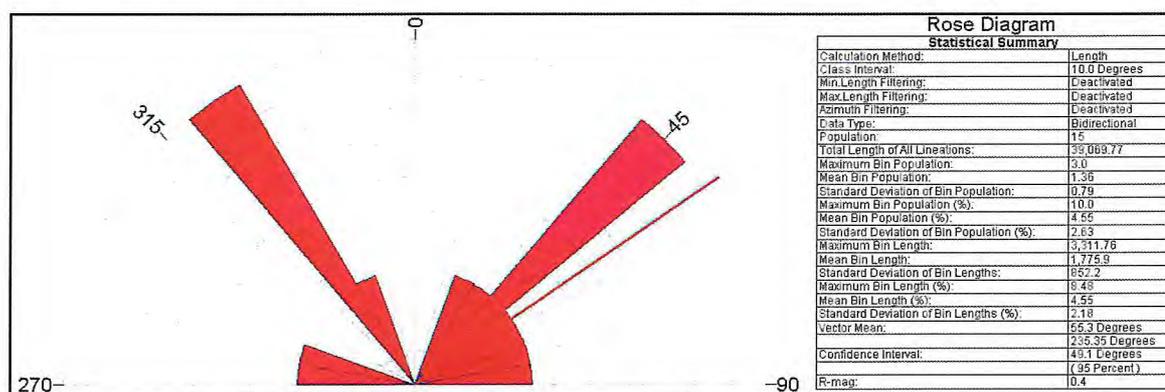
Para tentar contornar o problema de acessibilidade e para medidas de comparação, foram selecionados apenas os lineamentos extraídos manualmente e automaticamente que estavam contidos dentro da área em que foram medidas estruturas em campo (Figura 22) e foi gerado um diagrama de roseta para cada. (Figura 23 e 24).

Figura 22 – Lineamentos manuais e automáticos contidos nas áreas visitadas em campo.



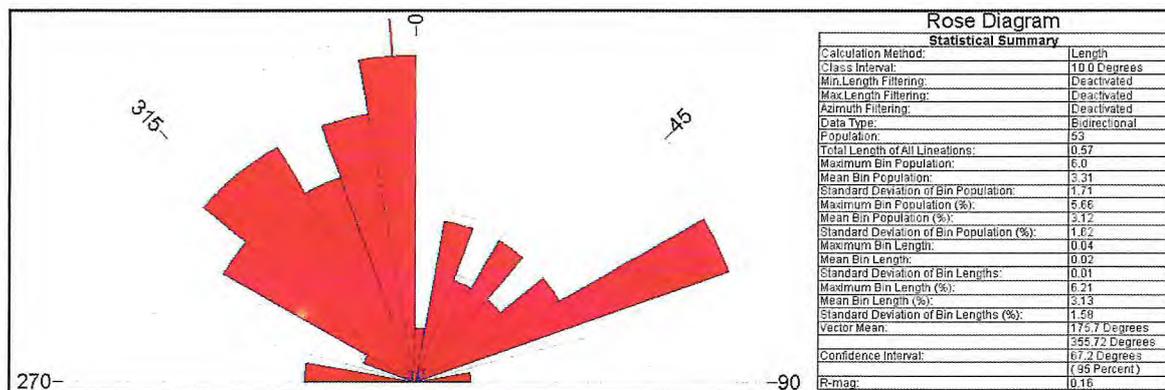
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 - Diagrama de roseta para os lineamentos extraídos manualmente que estão contidos nas áreas visitadas em campo.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 24 - Diagrama de roseta para os lineamentos extraídos automaticamente que estão contidos nas áreas visitadas em campo



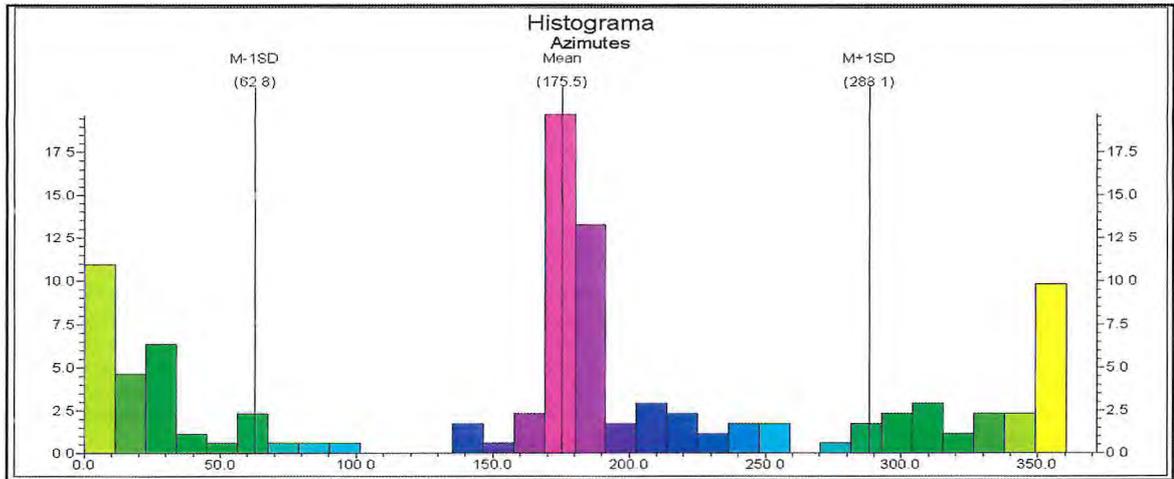
Fonte: Elaborado pelo autor

Nos lineamentos extraídos manualmente, evidenciam-se 2 principais famílias de lineamentos: 320-330 e 40-50, enquanto nos lineamentos extraídos automaticamente destacaram-se 4 famílias: 310-320, 320-330, 350-360 e 60-70. Essa disparidade entre os dados da extração manual e automática em comparação com a medida em campo se dá pela baixa quantidade de lineamentos obtidos nos lineamentos manuais contidos nas áreas visitadas: somente 15. Essa quantidade não é representativa para a área de estudo, fazendo com que os lineamentos da família 350-360, por exemplo, não apareçam no diagrama de roseta. Já nos extraídos automaticamente contidos nas áreas visitadas, obtém-se todas as famílias presentes na área, com destaque para a família 350-360 e para o vetor médio.

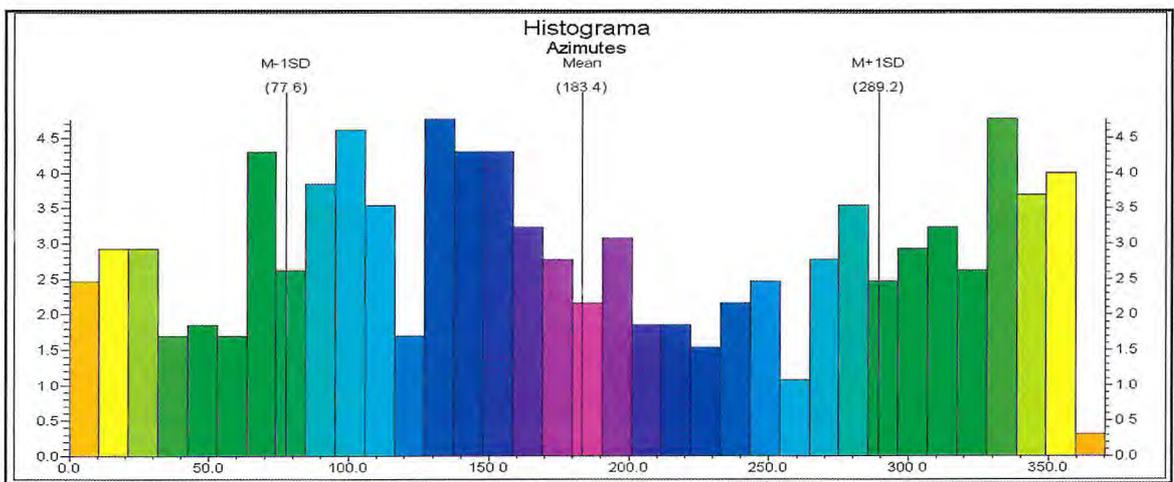
Para medidas de comparação estatística, foram gerados três histogramas (Figura 27 a,b,c) onde foi evidenciado a similaridade dos dados obtidos. Todos os três histogramas mostraram uma média de azimuth medindo entre 170 e 190, indicando que a média dos azimuths dos lineamentos é N-S. Foi possível identificar a ocorrência de ruídos no histograma de lineamentos automáticos, gerados pela grande quantidade de lineamentos detectados pelo método de detecção de bordas do algoritmo *Line* do *software* Geomatica. No entanto, mesmo com a presença de ruídos, o histograma identificou uma média de azimuth condizente com os outros métodos.

Figura 22 – Histograma dos lineamentos manuais (a), automáticos (b) e dos medidos em campo (c)

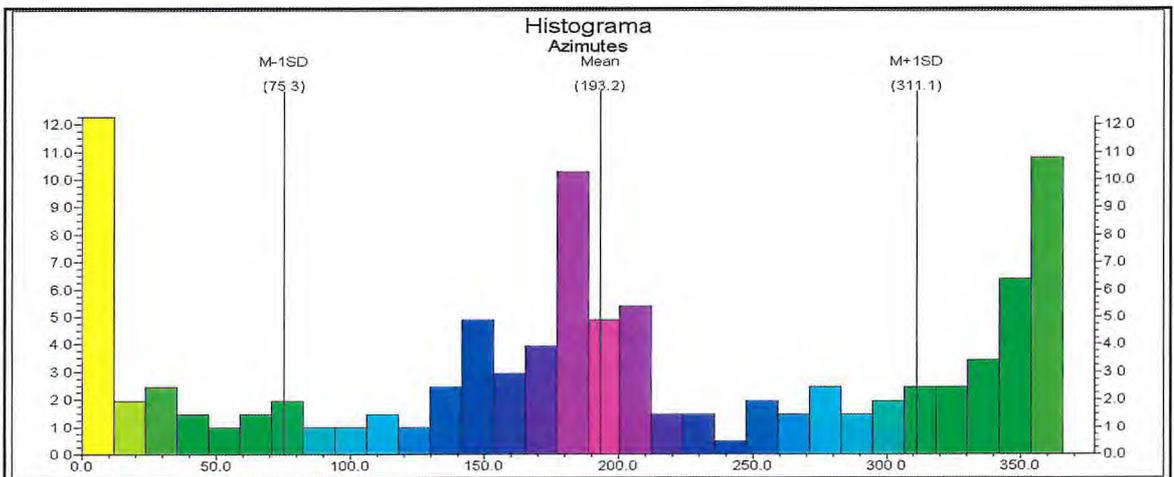
a)



b)



c)



5. CONCLUSÃO

Através desta avaliação foi possível concluir que a metodologia empregada para gerar relevos sombreados multidirecionais foi eficiente, de forma que foram gerados os resultados esperados no realce das feições em todas as direções desejadas, tornando possível, mais rápido e prático todo o trabalho, uma vez que só foi preciso ser feito uma vez todo o processamento na geração de lineamentos.

Com a imagem de relevo sombreado multidirecional, o processo de identificação dos lineamentos de forma manual (identificação visual) se tornou mais eficiente e fácil. Com isso, o processo de identificação automática dos lineamentos por meio do método de detecção de bordas, utilizadas pelo algoritmo LINE do *software* Geomatica 2016 foi mais eficaz, gerando resultados aceitáveis e dentro do contexto geológico regional.

Mesmo com a dificuldade de acesso à totalidade da área de estudo, a etapa de campo foi importante como parâmetro para comparação dos métodos de identificação manual e automática, uma vez que foram selecionados os lineamentos manuais e automáticos contidos dentro da área visitada e o resultado, com exceção dos lineamentos manuais que não obtiveram uma boa representatividade, foi dentro do contexto geológico regional.

A grande disparidade na quantidade de lineamentos entre os métodos manual e automático deve ser investigada mais a fundo, de modo a diminuir a frequência dos chamados “ruídos” no método automático, melhorando assim ainda mais os resultados obtidos. Para trabalhos posteriores, recomenda-se o emprego de uma etapa de campo onde possa haver maior cobertura da área, tornando possível o melhoramento da técnica de identificação automática de lineamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, A.; AKHIR, J.M.; ABDULLAH, I. 2010. **Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia.** *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. V.15; 949 – 957p.
- ALHIRMIZY, S., 2015. **Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEM) in Kirkuk Northeast Iraq.** *International Journal of Science and Research (IJSR)*. V.4, No 5; 2228 – 2233p
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.; **Províncias estruturais brasileiras. VIII Simpósio de Geologia do Nordeste, 1977, Campina Grande, p. 363-391.**
- AMARAL, W. S. 2011. **Caracterização estrutural, geoquímica, geocronológica e aerogeofísica das sequências de rochas máfica e ultramáfica da região de Novo Oriente-CE, Domínio Ceará Central, NE do Brasil.** Projeto Universal CNPq, Fortaleza. 22p.
- ARTHAUD, M.H., VASCONCELOS, A.M. & OLIVEIRA, F.V.C. 1998. **As sequências metasedimentares do Ceará Central.** XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte-MG, Anais, pág. 16
- BRITO NEVES, B.B. 2000. **Tectonic history of the Borborema Province, NW Brazil.** In: Cordani U.G. Milani, E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds) *Tectonic Evolution of South American*, Rio de Janeiro, 151-182 p.
- BROWN, K. D., 2014. **Creating Slope-Enhanced Shaded Relief Maps Using Global Mapper.** *Utah Geological Survey*. Título da pesquisa disponível em: <http://www.geosoluciones.cl/documentos/globalmapper/Creating-Slope-Enhanced-Shaded-Relief-Using-Global-Mapper.pdf>. Acesso em 23/05/2017
- CABY, R. A. & ARTHAUD, M.H. (1986). **Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, northeast Brazil.** *Geology*, v. 14; p. 871 e 874.
- CASTRO, N. A., 2004. **Evolução Geológica Proterozoica da Região entre Madalena e Taperuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema).** Inst. Geociências, USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 221p.
- CASTRO, G. L.; PARENTE, C. V.; VERÍSSIMO, C. U. V; SIAL, A. N.; GARCIA, M. G. M. SANTO, R. V.; MELO, R. C.; SANTOS, A. A. 2005 **Isótopos de carbono e oxigênio dos mármores associados com o depósito fósforo uranífero de Itataia, Ceará.** *Rev. Bras. Geoc.*, 35(2):199-208.

CAVALCANTE, J.C., VASCONCELOS, A.M., MEDEIROS, M.F., PAIVA, I.P., GOMES, F.E.M., CAVALCANTE, S.N., CAVALCANTE, J.E., MELO, A.C.R., DUARTE, V.C., BENEVIDE S, H.C. 2003. **Mapa Geológico do Estado do Ceará - Escala 1:500.000**. Fortaleza, Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais.

FARR, T. G; ROSEN, P. A; CARO, E; CRIPPEN, R; DUREN, R; HENSLEY, S; KOBRICK, M; PALLER, M; RODRIGUEZ, E; ROTH, L; SEAL, D; SHAFFER, S; SHIMADA, J; UMLAND, J. 2000. **The Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: http://www3.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf.

FETTER, A. (1999). **U/Pb and Sm/Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana**. Ph.D. thesis. Department of Geology, Kansas University, Lawrence, KS, USA. 164 p.

FETTER, A.H., SANTOS, T.J.S.; VAN SCHMUS, W.R.; HACKSPACHER, P.C; BRITO NEVES, B.B.; ARTHAUD, M.H., NOGUEIRA, J.A.; WERNICK, E., 2003. **Evidence for Neoproterozoic Continental Arc Magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana**. *Gondwana Research*, V. 6, No. 2, 265-273 p.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Santa Quitéria (CE)**. 2011. In: IBGE Cidades. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?codmun=231220&r=2>.

IEA, **International Atomic Energy Agency, 2003. Guidelines for radioelement using gamma ray spectrometry data**. Viena, 173p

INB. **Indústrias Nucleares do Brasil. INB Santa Quitéria**. 2011. Disponível em: http://www.inb.gov.br/inb/webforms/interna.aspx?secao_id=52.

LIU, C. C. **Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao Estado do Rio de Janeiro**. 1984. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 1984. doi: 10.11606/T.44.1984.tde-25082015-143959. Acesso em: 2017-06-24.

LOPES, M.F.L.; FONTENELE, G.R.; GAMEIRO, S.; MIRANDA, M.P.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S. **Análise comparativa dos lineamentos da região da jazida fósforo-uranífera de Itataia-CE gerados através dos MDE: SRTM+, ASTER GDEM 2 e TOPODATA**. Em: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18 (SBSR), 2017, Santos. Anais... Santos: INPE, 2017. p. 0763-0770. ISBN: 978-85-17-00088-1

- MARTINS, G., 2000. **Litogeoquímica e Controle Geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró**. Inst. De Geociências, UNICAMP, Campinas-SP, Tese de Doutorado, 218p.
- MENDONÇA, J.C.G.S.; BRAGA, A.P.G.; CAMPOS, M. 1980. **Considerações sobre a mineralização fósforo-uranífera da jazida de Itataia-CE**. Anais do XXXI Congr. Bras. Geol., Santa Catarina, vol. 4, p.2472-2486.
- MENDONÇA J.C.G.S., CAMPOS M., BRAGA A.P.G., SOUZA E.M., FAVALI J.C., LEAL J.R.L.V. 1983. **Jazida de Urânio de Itataia-CE**. In: Principais Depósitos Minerais do Brasil, DNPM, v.1, p.121-131.
- MENEZES, P. R. & ALMEIDA, T. 2012. **Introdução ao processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNB - Universidade de Brasília; CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Brasília, 2012, 276p. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>
- NASA JPL. 2013. **Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second**. NASA LP DAAC. Disponível em: <http://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>.
- NEVES, S. P. (2003), **Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana**, *Tectonics*, 22, 1031, doi: 10.1029/2001TC001352, 4.
- NOVO, E. M. L. M. 2008. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. – São Paulo: Blucher. p. 152-161.
- NUCLEBRÁS. **Jazida de Itataia: relatório de pesquisa mineral**. Fortaleza: INB, 1984. 330 p.
- O'LEARY, D. W., FRIEDMAN, J. D., AND POHN, H. A. 1976. **Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms**. *Geological Society America Bulletin* 87: 1463-1469.
- RABUS, B; EINEDER, M; ROTH, A; BAMLER, R. 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262.
- ROSA JUNIOR, C.A.; MARANHÃO, R.M.R.; DUARTE, C.R. **Contribuição à Geologia da Região da Jazida de U-P de Itataia /CE a Partir de Estatística de Bandas e Processamento Digital de Imagens Landsat**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa – PB. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos – SP: INPE, 2015. p. 4123-4130.

ROSEN, P. A; HENSLEY, S; JOUGHIN, I.R; LI, F. K; MADSEN, S. N; RODRÍGUEZ, E; GOLDSTEIN, R. M. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, nº. 3, p. 333-382.

SANTOS, T. J. S., FETTER, A., HACKSPACHER, P., VAN SCHUMS, W. AND NOGUEIRA NETO, J. 2004. **Structural and geochronological studies of the Médio Coreaú Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic evolution in the NW part of the Borborema Province.** In: 158 (eds.) Weinberg, R., Trouw, R., Fuck, R. and Hackspacher, P., The 750-550 Ma Brasiliano Event of South America, Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition, ISSN 1441-8142, Volume 17, Paper 9.

SILVA, J.R.A. Caracterização hidrogeológica da jazida de Itataia-CE. 2003 – Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.

TEIXEIRA, M.L.A. 2005. **Integração de Dados aerogeofísicos, geológicos e Isotópicos do Limite Norte do Complexo Tamboril-Santa Quitéria-CE, Província Borborema.** Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 86 p.

VERÍSSIMO, C. U. V.; SANTOS, R. V.; PARENTE, C. V.; OLIVEIRA, C. G.; CAVALCANTI, J. A. D.; NOGUEIRA NETO, J. A. 2017. **The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceará, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies.** Journal of South American Earth Sciences, v. 70, p. 115-144, 2016.