



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Influência de lineamentos estruturais no desencadeamento dos movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, Ceará

Eduardo Viana Freires<sup>1</sup>, Cláudio Ângelo da Silva Neto<sup>1</sup>, Cynthia Romariz Duarte<sup>2</sup>, César Ulisses Vieira Veríssimo<sup>2</sup>, Daniel Dantas Moreira Gomes<sup>3</sup>, Antônio Edilson Pereira Souza<sup>4</sup>, Maykon Targino da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza/CE. E-mail: [eduardovgeo@gmail.com](mailto:eduardovgeo@gmail.com) (autor correspondente); <sup>2</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza/CE; <sup>3</sup> Departamento de Geografia, Universidade de Pernambuco (UPE), Campus Garanhuns; <sup>4</sup> Defesa Civil do Município de Maracanaú (CE).

Artigo recebido em 11/12/2019 e aceito em 23/03/2020

### RESUMO

A disposição de estruturas geológicas em áreas planálticas é elemento importante na compreensão da dinâmica que ocorre na superfície de suas encostas e que é responsável pela esculturação do relevo. Neste contexto destacam-se os movimentos gravitacionais, que podem gerar perdas econômicas, ambientais e humanas em eventos de alta energia e/ou com grande extensão. Esta pesquisa analisou a influência de lineamentos estruturais no desencadeamento dos movimentos gravitacionais no Maciço de Uruburetama, localizado no estado do Ceará. A metodologia consistiu na extração automática de lineamentos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) fornecido pelo sensor orbital ALOS PALSAR. A partir da média de filtros direcionais aplicados a 0°, 45°, 90° e 135° de iluminação foi possível realçar as feições lineares da imagem original, facilitando sua extração. Posteriormente, foram elaborados mapas de distribuição espacial e densidade de lineamentos, além de diagrama de roseta. Tais produtos subsidiaram a análise da disposição dos principais trends estruturais da área, destacando que a maior densidade e a orientação predominante de lineamentos podem ser indicativas do grau de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, desde que também sejam consideradas as características físicas dominantes e o grau de intervenção humana nas encostas. Os resultados demonstraram que os lineamentos estruturais obtidos de forma automática, quando analisados em conjunto com as características ambientais podem ser aplicados na análise de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa. Palavras-chave: ALOS PALSAR, filtros direcionais, fusão de imagens, extração de lineamentos.

## Influence of structural lineaments as a trigger of mass movements in the Uruburetama massif, Ceará state, Brazil

### ABSTRACT

The geological structures arrangement in plateau areas is an important element in understanding the dynamics that occur on the surface of their slopes and which is responsible for relief sculpting. In this context, gravitational movements stand out, which can generate economic, environmental and human losses in high energy events and / or with large extension. This research analyzed the influence of structural lineaments in the gravitational movements triggering in the Uruburetama massif, located in the state of Ceará. The methodology consisted of automatic extraction of lineaments from the Digital Elevation Model (DEM) provided by the ALOS PALSAR orbital sensor. From the average of directional filters applied at 0°, 45°, 90° and 135° of illumination it was possible to enhance the linear features of the original image, facilitating their extraction. Subsequently, maps of spatial distribution and lineaments density were developed, as well as a rosette diagram. Such products subsidized the analysis of the disposition of the main structural trends of the area, emphasizing that the higher density and the predominant orientation of lineaments may be indicative of the degree of susceptibility to the occurrence of mass movements in the Uruburetama massif, if the dominant physical conditions and the degree of human intervention on the slopes are also considered. The results showed that the structural lineaments obtained automatically, when analyzed together with the environmental characteristics can be applied in the susceptibility analysis to the occurrence of mass movements.

Keywords: ALOS PALSAR, directional filters, image fusion, lineaments extraction

### Introdução

A geomorfologia do Nordeste brasileiro é marcada por estruturas deformacionais dúcteis e

rúpteis registradas no embasamento cristalino de origem Pré-cambriana e representadas por um conjunto de feições desenvolvidas ao longo de zonas de falhas (Maia e Bezerra, 2014). Neste

contexto, as zonas de cisalhamento exercem importante controle nas feições morfológicas da região, condicionando a geração e evolução de maciços estruturais, cristas lineares e vales incisos. Tais feições compõem altos e baixos topográficos, orientados segundo a direção dos *trends* estruturais (Maia e Bezerra, *op. cit.*).

Nas áreas dos terrenos cristalinos, formados por rochas metamórficas – normalmente gnaisse – e ígneas graníticas, o relevo esculpido é geralmente suave e resultado da erosão seletiva ao longo de linhas de fraqueza, relacionadas a fraturas, juntas, dobras ou rochas débeis que formam depressões, ou, então, rochas duras, que tendem a originar áreas mais elevadas (Penha, 2005).

Apesar de mais de 90% do volume da crosta ser constituído por rochas ígneas e metamórficas, os sedimentos e as rochas sedimentares recobrem aproximadamente 66% da superfície dos continentes. Todavia, mesmo nessas áreas, em grande parte cobertas por fina película sedimentar, as estruturas existentes no embasamento subjacente se refletem na cobertura, controlando em maior ou menor grau a modelagem da superfície. As faixas fraturadas ou diaclasadas, zonas hidrotermalizadas, estruturas planares e lineares, por serem mais susceptíveis à meteorização, tendem a formar setores rebaixados, em contraste com as áreas constituídas por rochas maciças, com raras discontinuidades e, portanto, mais elevadas (Penha, *op. cit.*).

As fraturas e falhas representam importantes discontinuidades, tanto em termos mecânicos quanto hidráulicos. O avanço da frente de intemperismo nos maciços rochosos é influenciado diretamente pela presença de fraturas de alívios de tensão e falhas, que atuam como caminhos preferenciais de alteração, permitindo o avanço dos processos para o interior do maciço de forma muito mais efetiva, sendo preponderantes para a ocorrência de movimentos gravitacionais (Fernandes e Amaral, 2004). Da mesma forma a orientação da foliação e/ou o bandamento composicional influenciam diretamente na estabilidade das encostas em áreas onde afloram rochas metamórficas, ou ainda em cortes de estrada onde o mergulho das camadas ocorre para fora das encostas.

O conhecimento do substrato, formado por complexos metamórficos/magmáticos, é de grande importância na investigação geomorfológica dessas regiões (Penha, 2005). Portanto, conhecer as estruturas geológicas dessas áreas é primordial para compreender os fenômenos que ocorrem na superfície dos terrenos, como a erosão diferencial e

os movimentos de massa, e que são responsáveis pela esculturação do relevo.

Para Bastos (2012), as características geológicas são importantes na deflagração dos movimentos de massa ao influenciar os fluxos de água superficiais e subsuperficiais e, conseqüentemente, provocar a instabilidade dos materiais.

A deflagração de movimentos de massa envolve uma série contínua de eventos de causa e efeito que resultam na ruptura de materiais terrestres (solo e/ou rocha), quando as solicitações são maiores que a resistência dos terrenos (Bitar, 1995).

Segundo Hart (1988, *apud* Jorge e Guerra, 2013), os movimentos de massa resultam da força de cisalhamento nas encostas, causada pela gravidade, peso do material e água no solo, que consegue sobrepor a resistência dos materiais, determinada por propriedades de coesão dos solos.

“Os movimentos de massa, lentos ou rápidos, são provocados por atividade biológica ou por processos físicos resultantes de condições climáticas, mas a ação da gravidade é o fator principal” (Penteado, 1980, p.100).

Os vários tipos de movimentos de massa dependem de fatores, como: estrutura geológica; tipo dos materiais; declividade; orientação e forma da vertente; área de contribuição; intensidade; e distribuição das precipitações. Diferentes metodologias vêm sendo desenvolvidas tendo em vista a previsão dos movimentos de massa, a qual pode subsidiar os administradores públicos em atividades, como: elaboração de planos de evacuação; elaboração de mapas de susceptibilidade; planejamento urbano; e planejamento de traçado de rodovias, entres outros (Guimarães *et al.*, 2008)

Além da frequência elevada dos movimentos de massa em razão das condições naturais, ocorre também um grande número de acidentes associados às intervenções antrópicas nas vertentes. Dentre as intervenções em áreas urbanas, a que mais preocupa é a ocupação irregular das encostas, com o conseqüente desmatamento e corte de taludes, propiciando uma maior susceptibilidade à ocorrência dos movimentos de massa (Guimarães *op cit.*).

O homem vem se constituindo no mais importante agente modificador da dinâmica das encostas. O avanço das diversas formas de uso e ocupação do solo em áreas naturalmente susceptíveis aos movimentos gravitacionais de massa acelera e amplia os processos de instabilização nas vertentes (Bitar, 1995).

Conforme Jorge e Guerra (2013), o que pode ser observado nas últimas décadas, no Brasil

e em vários outros países, é a aceleração dos movimentos de massa, não apenas causados pelas variáveis do meio físico, mas, principalmente, pela maneira como as construções são feitas sem considerar os riscos naturais inerentes de cada ambiente.

De acordo com Loureiro e Ferreira (2013), o conhecimento da dinâmica dos processos erosivos e dos fatores condicionantes dos movimentos de massa é de extrema relevância para um planejamento e gestão ambiental eficaz, já que a compreensão da gênese e abrangência desses fenômenos se faz essencial para mitigar as perdas materiais e humanas que eles geram.

O Maciço de Uruburetama, localizado na porção setentrional do estado do Ceará, apresenta características geológicas que favorecem os processos erosivos e o desencadeamento de movimentos de massa.

Esse maciço apresenta grande influência do controle estrutural, com falhas que representam descontinuidades do relevo e podem ser associadas tanto a eventos tectônicos pretéritos, como também a alívios de pressão (Lima *et al.*, 2015).

O relevo mostra-se intensamente dissecado em colinas e cristas, com vales superimpostos, em forma de V, segundo uma disposição paralela e orientada a NW-SE (Brandão, 2003). O maciço é fortemente tectonizado e intensamente fraturado, cujas estruturas influenciam diretamente na rede de drenagem que, em muitos casos, se adapta a elas (Souza e Oliveira, 2006).

Os lineamentos topográficos que representam estas estruturas podem ser indicativos da suscetibilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais. Portanto, a extração e espacialização dos lineamentos, bem como a análise de densidade e orientação dessas feições podem revelar quais as áreas ou setores do maciço apresentam maior predisposição à ocorrência desses eventos.

Nesse sentido, esta pesquisa objetiva avaliar a influência de lineamentos estruturais no desencadeamento de movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, tendo como suporte de análise o MDE ALOS PALSAR e sistemas de informações geográficas.

Este maciço residual possui cerca de 1.000 km<sup>2</sup> de área e está localizado, aproximadamente, 100 km a oeste de Fortaleza (Souza e Oliveira, 2006). Ele é consistido por um relevo montanhoso de formato circular, sendo um pouco alongado na direção E-W (Brandão e Freitas, 2014).

A altitude média do maciço situa-se entre 500 e 800m, alcançando mais de 1.000 m em locais específicos, como no limite municipal entre Itapajé e Itapipoca (Silva, 2007; Lima *et al.* 2019).

Como pode ser observado na Figura 1, o Maciço de Uruburetama está localizado dentro dos limites administrativos de oito municípios (Itapipoca, Irauçuba, Itapajé, Uruburetama, Tururu, Tejuçuoca, Miraíma e Umirim), que, conforme IBGE (2018), apresentam em sua totalidade uma população estimada para 2018 em 336.462 habitantes. Esse fato não só remete à pressão exercida sobre a área como também reflete a dificuldade de implementar um planejamento ambiental no Maciço.

O Maciço de Uruburetama pode ser sub-compartimentado, de acordo com aspecto climático regente, em três unidades geomorfológicas: vertente úmida; vertente subúmida seca; e vertente seca (Brandão, 2003; Silva, 2007; Falcão Sobrinho *et al.* 2019).

As porções voltadas para o litoral, a barlavento (vertente úmida), apresentam condições de umidade elevadas, favorecendo o desenvolvimento de solos profundos e, conseqüentemente, uma vegetação mais densa e de maior porte. Nos setores a sotavento (vertente subúmida seca e vertente seca), as condições climáticas são mais agressivas (secas), sendo o intemperismo físico o principal agente modelador da paisagem. Nessas vertentes, predominam os solos rasos, com frequentes afloramentos rochosos, condicionando a presença de uma vegetação mais seca e menos densa (Brandão, 2003).

### Contexto Geológico

Localizada na província da Borborema, a área de estudo é constituída em quase sua totalidade por rochas do Complexo Nordestino, formação cronologicamente pertence ao Pré-Cambriano do inferior-médio (Oliveira, 2002). A unidade litoestratigráfica no maciço é representada pela Suíte Intrusiva Tamboril-Santa Quitéria. Conforme Schobbenhaus e Neves (2003), essa unidade, formada na Era Neoproterozoica (1,0 Ga – 540 Ma), é composta por rochas plutônica félsicas a intermediárias.

Com relação à distribuição litológica, conforme pode ser observado na Figura 2, os granitoides correspondem quase à totalidade do maciço. Em menor escala ocorrem associações granito-migmatíticas ao sul e a sudoeste da área, e paragneisses-granitoide numa porção restrita ao sul do maciço.

As unidades de menor abrangência são os depósitos quaternários de origem aluvial e colúvio-aluvial, que se encontram distribuídos em diferentes setores da área de pesquisa, onde predominam processos de sedimentação.

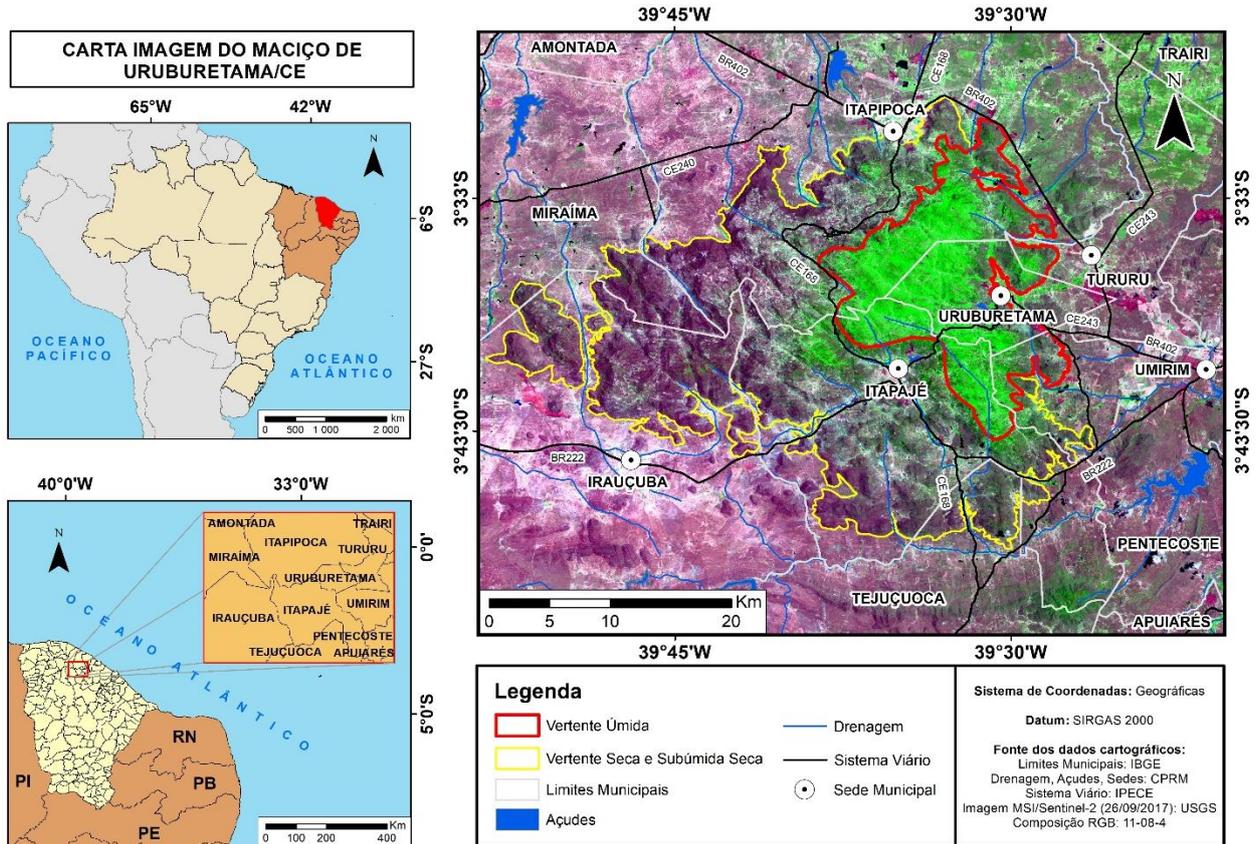


Figura 1. Localização do Maciço de Uruburetama na porção norte do estado do Ceará.

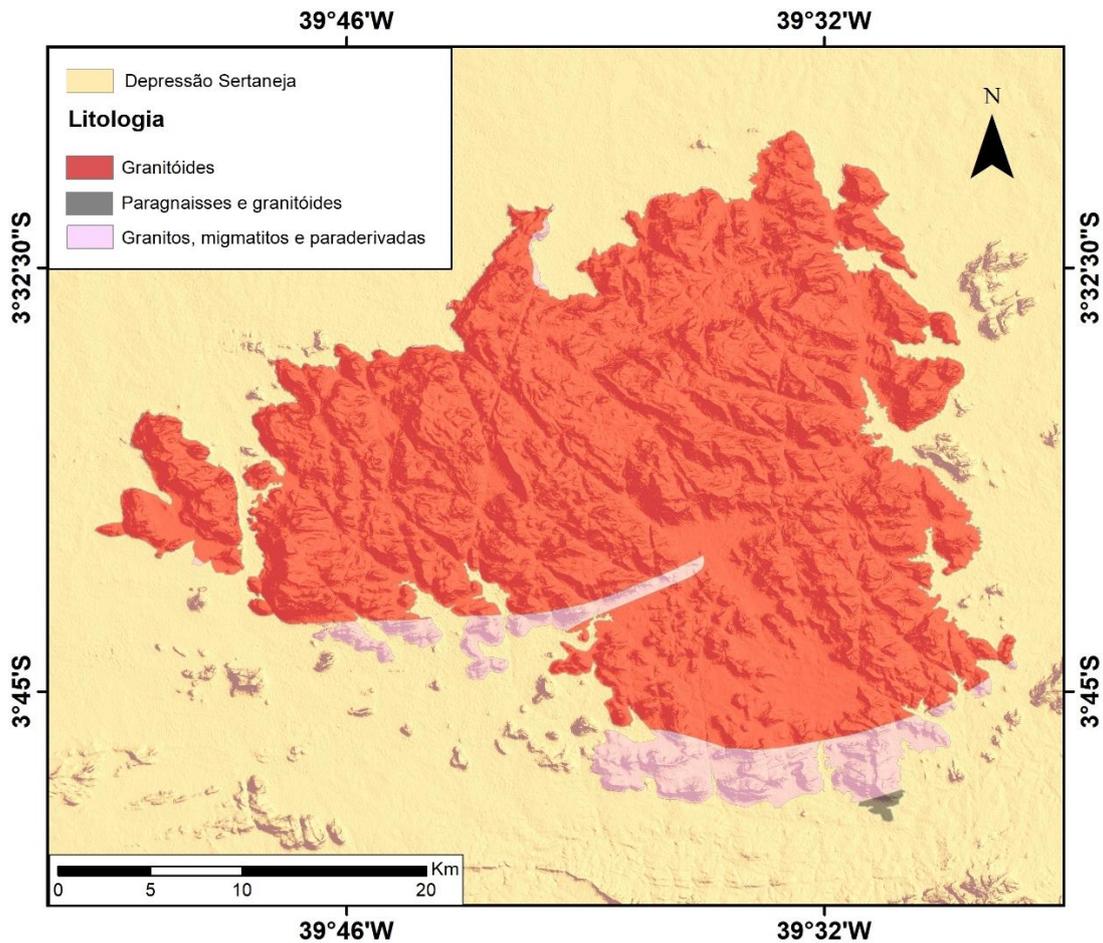


Figura 2. Litologias constituintes do maciço de Uruburetama. Fonte: adaptado de Cavalcante *et al.* (2003).

Depósitos aluviais (localmente colúviais) são formados por argilas, areias argilosas, quartzosas e quartzofeldspáticas, conglomeráticas ou não, cascalhos e argilas orgânicas / fluvial (Cavalcante, 2003).

**Metodologia**

Conforme observado no fluxograma da Figura 3, a metodologia da pesquisa se deu em três etapas: aquisição de dados; processamento das imagens obtidas; e interpretação dos resultados.

Na primeira etapa da pesquisa foi adquirida uma imagem orbital do satélite Sentinel-2 de 26 de setembro de 2017, com até 10 m de resolução espacial, já devidamente georreferenciada e ortoretificada, no site do Serviço Geológico do Estados Unidos - USGS, e o Modelo Digital de Elevação (MDE) do Sensor ALOS PALSAR, órbita absoluta 27262, frame 7110, com resolução espacial de 12,5 m, de 8 de março de 2011, disponibilizado na base de dados do Alaska Satellite Facility, da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA).

Paralelamente, foi realizada a revisão bibliográfica que subsidiou a pesquisa e permitiu identificar e caracterizar os movimentos de massa, a partir das classificações de Guidicini e Nieble (1983) e IPT (1991), que podem ser observadas no

Quadro 1, e compreender a morfodinâmica da área a partir da Ecodinâmica de Tricart (1977). Na atividade de campo foram identificados e registrados os movimentos de massa e a influência natural e antrópica na deflagração do fenômeno.

Para suporte de avaliação e processamento das imagens foram utilizados os softwares Global Mapper 18.1, ArcGIS® 10.5, PCI Geomatica 2018 e Stereonet 10.

No software ArcGIS 10.5 as duas imagens subsidiaram a delimitação do Maciço de Uruburetama em relação aos limites topográficos da depressão sertaneja, cujas cotas estão entre 100 e 200 m, e também a delimitação da vertente úmida da serra a partir da topografia e da ocorrência da Floresta subperenifólia tropical pluvionebular (mata úmida).

O MDE ALOS PALSAR foi utilizado para identificação das feições estruturais no Maciço de Uruburetama.

Para obtenção das feições lineares, ou trends estruturais, inicialmente foram aplicados, no software Global Mapper 18.1, os filtros direcionais ao MDE ALOS PALSAR, com a iluminação orientada aos azimutes de 0°, 45°, 90°, 135° e zênite de 70 m de altitude. Conforme Batista (2014), os filtros direcionais promovem o ressaltado das estruturas lineares que se encontram em direção paralela à direção do filtro.

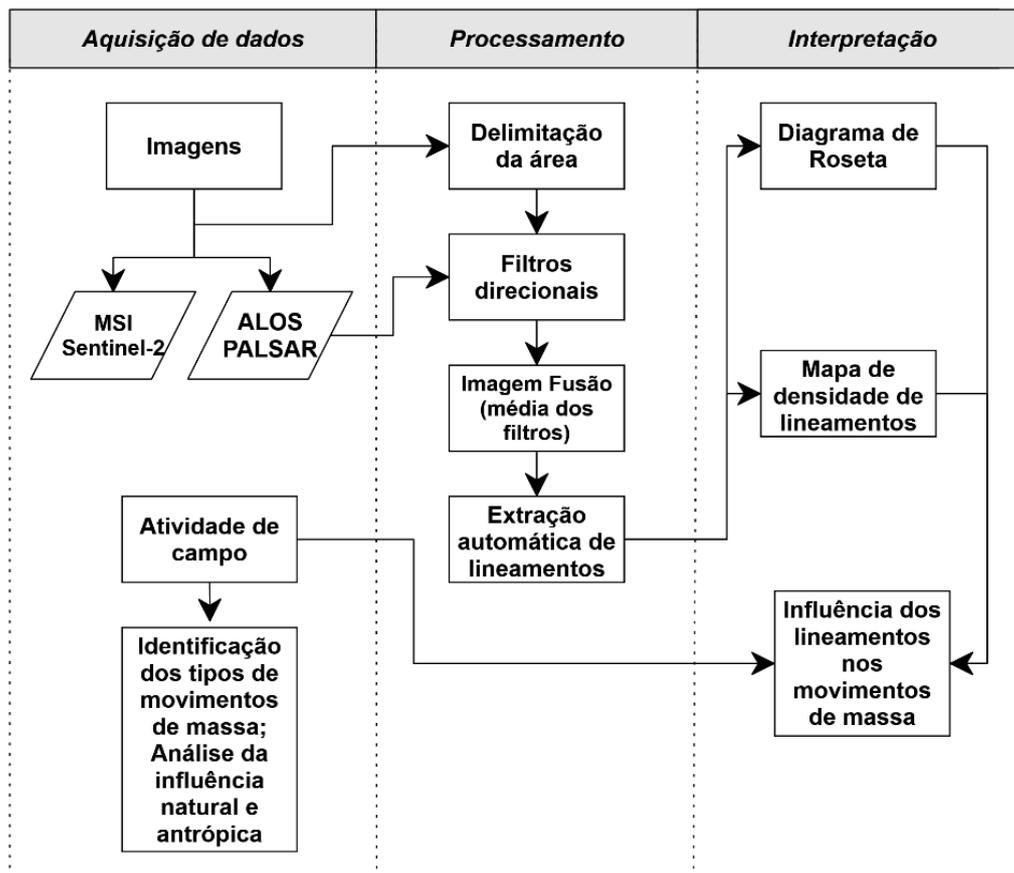


Figura 3. Principais etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa.

Quadro 1. Classificação dos tipos de movimentos de massa

<b>Guidicini e Nieble (1983)</b>	<b>IPT (1991)</b>
<i>Escoamentos</i>	<i>Rastejos</i>
Rastejos	
Corridas	<i>Corridas de Massa</i>
<i>Escorregamentos</i>	
Rotacionais	<i>Escorregamentos</i>
Translacionais	
Quedas de blocos	<i>Quedas/Tombamentos</i>
Quedas de detritos	
<i>Subsidências</i>	
Subsidências	-----
Recalques	
Desabamentos	
<i>Formas de Transição</i>	-----
<i>Movimentos Complexos</i>	

Fonte: adaptado de Fernandes e Amaral (2004).

Após a aplicação dos filtros direcionais sobre o MDE, as imagens foram salvas em formato *GeoTiff* e em seguida foram submetidas ao processo de fusão, através da ferramenta *Raster Calculator* do *ArcGIS*® 10.5, conforme metodologia de Abdullah *et al.* (2010) e Lopes (2017). Como demonstrado na equação 1, a fusão consistiu na média aritmética entre as imagens com azimutes 0°, 45°, 90° e 135°, que resultou numa imagem onde se preservam as estruturas realçadas nas diferentes direções utilizadas.

Equação 1:

$$\frac{Az0\ Alt70 + Az45\ Alt70 + Az90\ Alt\ 70 + Alt135\ Alt70}{4}$$

No intuito de comprovar a eficácia da aritmética aplicada, foi escolhido um ponto em comum para as quatro imagens representativas dos filtros direcionais e para a imagem fusão gerada a partir do cálculo. Em seguida foi utilizada a ferramenta *Extract Multi Values to Points* do *software* *ArcGIS* 10.5, para extrair o valor do *pixel* da mesma posição nas imagens mencionadas. Como pode ser verificado na Tabela 1, a médias dos valores de pixels obtidos das imagens dos filtros direcionais correspondem ao valor do *pixel* da imagem fusão obtida, o que comprova a qualidade do produto gerado.

Tabela 1. Valor do *pixel* no ponto pré-determinado nas quatro imagens com geometrias solares diferentes e na imagem fusão resultante da média das imagens

<b>Azimute Solar</b>	<b>Altitude Solar</b>	<b>Valor do pixel do ponto</b>
<b>0°</b>	70	186
<b>45°</b>	70	186
<b>90°</b>	70	205
<b>135°</b>	70	232
<b>Média</b>	70	202

A partir da imagem fusão gerada, os lineamentos foram extraídos automaticamente, através do algoritmo *LINE* do módulo *Focus* do *software* *PCI Geomática*. Os parâmetros estão apresentados na Tabela 2. Foram realizados vários testes, inclusive com parâmetros utilizados por outros autores, como Abdullah *et al.* (2010), Conceição e Silva (2013) e Lopes *et al.* (2017), porém os valores apresentados foram mais adequados às características geológicas e geomorfológicas da área de pesquisa.

Tabela 2. Parâmetros de entrada (*input*) utilizados através do algoritmo *LINE*

<b>Parâmetros</b>	<b>Algoritmo LINE</b>
<i>Filter Radius (Pixel)</i>	8
<i>Edge Gradient Threshold</i>	70
<i>Curve Length Threshold</i>	30
<i>Line Fitting Error Threshold</i>	3
<i>Angular Difference Threshold</i>	15
<i>Linking Distance Threshold</i>	30

A extração automática de lineamentos através do algoritmo *LINE* se dá a partir da manipulação de parâmetros globais que podem ser pré-definidos (*default*) ou alterados pelo usuário.

Esses parâmetros foram sumarizados conforme Conceição e Silva (2013):

**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.

De posse dos lineamentos extraídos automaticamente, foi realizada a medição da densidade dos vetores correspondentes aos lineamentos estruturais, no *software* ArcGIS 10.5, no intuito de identificar a relevância dessas feições no desencadeamento dos processos erosivos e movimentos de massa.

No *software* Stereonet 10 foi gerado o diagrama de rosetas no intuito de identificar e visualizar a direção predominante do *trend* regional dessas estruturas.

Na etapa final foi realizada a interpretação dos resultados.

### Resultados e Discussão

Os lineamentos correspondem a feições de larga escala que aparecem no relevo de uma região, podendo ser representada por uma crista montanhosa, ou um vale, resultante da geologia estrutural (Guerra; Guerra, 1997).

Brito *et al.* (2016), destacam que os lineamentos são expressões do relevo e desempenham um papel importante na intemperização das rochas, através da formação de planos de fraqueza, contribuindo para a redução dos parâmetros de resistência.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos lineamentos topográficos do Maciço de Uruburetama, obtidos a partir do procedimento de extração automática no *software* Geomatica 2018.

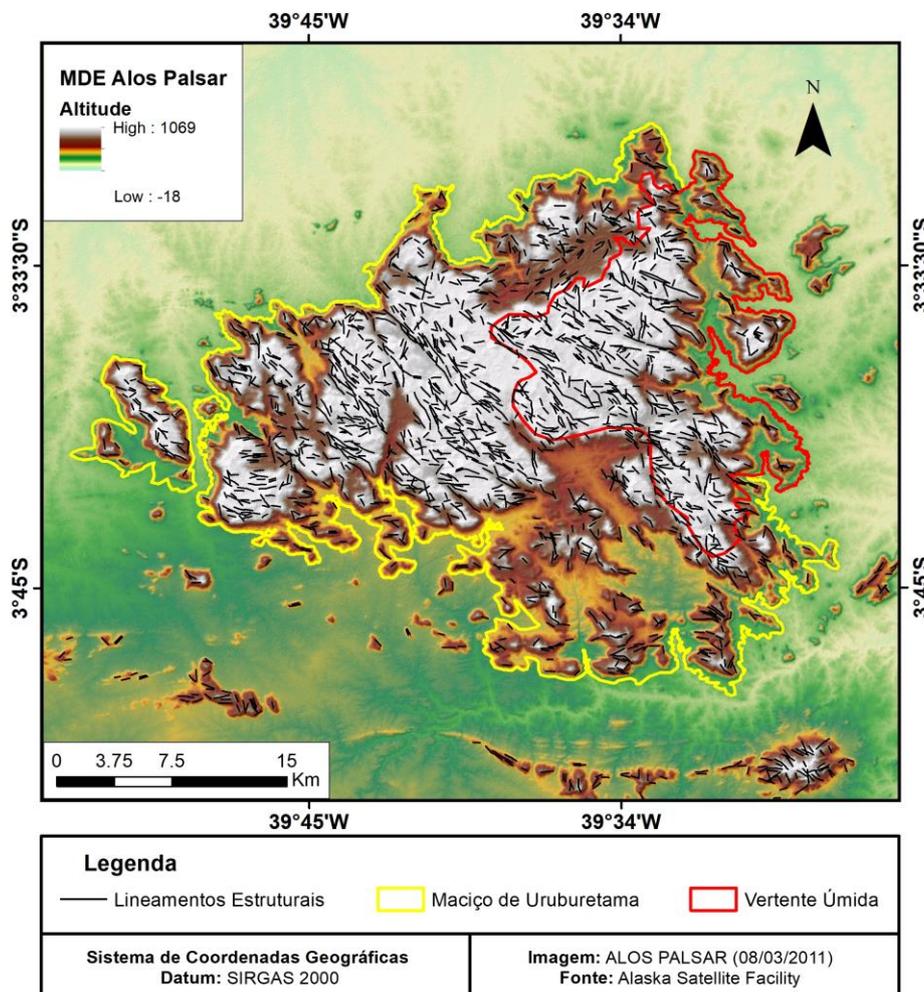


Figura 4. Lineamentos estruturais do Maciço de Uruburetama/CE.

Os lineamentos extraídos retratam um relevo fortemente fraturado e dissecado em cristas, colinas e lombas alongadas, que se alternam com vales em forma de V e planícies alveolares (Souza e Oliveira, 2006), como pode ser observado na Figura 5.

Os vales são esculpidos pela rede de drenagem que exibe um forte controle estrutural. Nos setores de suavização topográfica, a diminuição do gradiente implica no predomínio dos processos de sedimentação, que originam as planícies alveolares recobertas por sedimentos aluviais e coluviais (Souza e Oliveira, 2006).

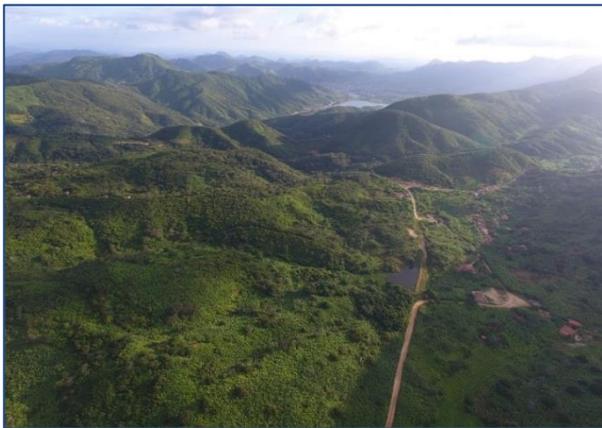


Figura 5. Feições do relevo do Maciço de Uruburetama. Foto: obtida por ARP (Daniel Dantas).

A altimetria média no Maciço de Uruburetama é de aproximadamente 750 m. Em áreas de maior umidade predominam as formas de topos convexos, com vertentes curtas e declives que variam de 10% a 30%. As cristas apresentam feições simétricas, com vertentes retilíneas e compridas (Figura 6). Os declives são mais íngremes e maiores do que 30%. (Souza e Oliveira, 2006). As cristas mais elevadas atingem de 800 a 900 metros de altitude (Brandão e Freitas, 2014).



Figura 6. Vertentes retilíneas e compridas. Foto: obtida por ARP (Daniel Dantas).

As vertentes norte e leste são mais úmidas (Figura 7-A), como verificado nos municípios de Uruburetama e Itapipoca que apresentam índices pluviométricos entre 1.100 e 1.300mm anuais, sendo que 2/3 dessas chuvas ocorrem no trimestre março-abril-maio (Souza e Oliveira, 2006), enquanto que as vertentes sul e oeste são mais secas (Figura 7-B), como observado nos municípios de Itapagé e Irauçuba. Esta última localidade, situada na Depressão Sertaneja junto à zona de sombra da serra de Uruburetama, registra pluviometria entre 400 e 500 mm/ano. Este é um dos mais baixos índices do estado do Ceará, fato que contribui para um cenário com estágio avançado de desertificação (Brandão, 2003).



Figura 7. (A) Vertente úmida no município de Uruburetama. Foto: obtida por ARP (Daniel Dantas); (B) Vertente seca no município de Itapagé. Fotos: Eduardo Freires.

Com relação aos solos, na vertente úmida do maciço há um predomínio dos Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos, solos bem estruturados, com gradiente textural entre os horizontes A e Bt, com boa fertilidade natural, muitas vezes associados a cascalhos e calhaus de quartzo (Figura 8-A). Nessa área prevalece o intemperismo químico e geração de solos profundos areno-argilosos ou argilo-arenosos, bem

drenados, e que são revestidos por redutos de mata atlântica subperenifólia.

Nas áreas secas há domínio de Neossolos Litólicos eutróficos, solos menos profundos, com horizonte A assente sobre a rocha ou sobre um horizonte C de pouca espessura, compreendendo solos muito suscetíveis aos processos erosivos e afloramentos de rocha (Figura 8-B). Neste caso, predominam os processos de intemperismo físico e geração de solos pouco profundos ou rasos, arenosos ou cascalhentos, com ocorrência de muitos blocos rochosos nas vertentes íngremes dos maciços residuais, estando revestidos por mata atlântica subcaducifólia, floresta estacional decídua (caducifólia) ou por caatinga arbórea (Brandão e Freitas, 2014).



Figura 8. (A) Argissolo vermelho-amarelo eutrófico; (B) Neossolo litólico e blocos rochosos na vertente. Fotos: Eduardo Freires.

Ao analisar as características físicas do Maciço de Uruburetama é possível identificar e distinguir os tipos e movimento de massa e os seus elementos deflagradores. Os condicionantes atuam com intensidades distintas nas vertentes úmida e seca.

Verificou-se que no setor úmido da serra há a prevalência de ocorrências de escorregamentos do tipo rotacional e translacional,

cujo material movimentado pode conter ou não blocos de rochas e detritos. Na área seca do maciço predominam quedas de blocos e detritos.

Essa tendência é verificada em função das características dominantes em cada um dos setores da serra. Enquanto na vertente úmida observa-se elevados índices pluviométricos, que favorecem a formação de solos mais desenvolvidos e profundos, e por sua vez propiciam o crescimento da floresta pluvionebulosa, na vertente seca os baixos índices de chuvas contribuem para ocorrência de solos rasos, recobertos por uma vegetação caducifólia ou subcaducifólia, e que são mais suscetíveis aos processos erosivos. Tal situação contribui para cenários distintos na dinâmica das vertentes.

Na vertente seca pode ser observado inúmeros blocos de rochas expostos a partir do processo de erosão das encostas (Figura 9).



Figura 9. Blocos de Rochas expostos a partir da erosão diferencial no município de Itapajé. Foto: Eduardo Freires.

Em muitos casos, o processo de erosão natural é responsável pelo desgaste do material que estabiliza o bloco provocando o seu movimento morro abaixo. As rochas e paredões rochosos também estão submetidas ao intemperismo físico que é responsável por sua fragilização e ao longo do tempo, associado a processos químicos, pode provocar rupturas e induzir a quedas de blocos e detritos. Por vezes, estes processos podem ser intensificados a partir das intervenções antrópicas nas vertentes, como atividades agrícolas praticadas de forma inadequada (Figura 10-A/B) ou cortes para abertura de estradas.

Lima *et al.* (2015), destacam que as culturas de subsistência do milho e do feijão, bem como a bananicultura, desenvolvidas nas encostas, além de promover a degradação da vegetação serrana, potencializam a ocorrência de eventos morfodinâmicos.



Figura 10. (A) Erosão acelerada em área de cultivo no município de Itapajé.; (B) Formação de voçoroca em área de cultivo no Município de Itapajé. Fotos: Eduardo Freires.

Na vertente úmida em virtude da ocorrência de solos mais profundos pode ser verificado uma dinâmica diferente. Os movimentos gravitacionais geralmente são compostos de material terroso. Em áreas de colúvios ou em depósitos de tálus o material movimentado pode conter seixos, calhaus e matacões. Essas formações podem ser facilmente instabilizadas, acarretando em movimentos de massa (Figura 11). Um grande volume de água precipitada pode aumentar o peso na encosta favorecendo a movimentação. Por outro lado, as intervenções provocadas nessas áreas potencializam as ocorrências já que a instabilidade mecânica é alta. Esta observação fica mais evidente no período chuvoso, quando as ocorrências aumentam.

Os movimentos de massa induzidos são aqueles deflagrados pela execução de cortes e aterros inadequados, pela concentração de águas pluviais e servidas, pela retirada da vegetação etc. (Riffel, *et al.*, 2016).

Os movimentos gravitacionais mais comuns na vertente úmida são os escorregamentos dos tipos rotacional e o translacional. Geralmente

estão associados aos cortes de encostas para construção de estradas.



Figura 11. Queda de blocos na Estrada para Itacolomy, Uruburetama. Fotos: Eduardo Freires.

Em muitos casos os taludes gerados pela abertura de estradas ficam expostos, sem nenhum método ou técnica de estabilização. Para agravar o quadro, os cultivos praticados encosta acima sem considerar a topografia do relevo e o uso indiscriminado da irrigação agravam a instabilidade detonando esses movimentos. Os cortes de estradas associados às práticas agrícolas inadequadas demonstram ser uma combinação determinante para deflagração dessas ocorrências, como pode ser observado nas Figuras 12-A e 12-B, em que são registrados escorregamentos do tipo rotacional e nas Figuras 13-A e 13-B que apresentam escorregamentos translacionais.

Os escorregamentos rotacionais apresentam superfície de ruptura curva, côncava para cima (forma de “colher”), ao longo da qual se dá um movimento rotacional da massa de solo. A presença de mantos de alteração espessos e homogêneos, como aqueles originados de rochas argilosas, facilita sua ocorrência. Geralmente estão associados à percolação da água em profundidade, sendo deflagrados algum tempo depois de um evento chuvoso. Esse tipo de escorregamento muitas vezes se dá em decorrência de cortes no sopé da encosta, provocados por erosão fluvial ou pela construção de moradias e estradas. Apresenta como feições típicas as escarpas de topo, fendas transversais na massa transportada e uma língua de material acumulado na base da encosta (Dias e Herrmann, 2002; Fernandes e Amaral, 2004).

Os Escorregamentos Translacionais representam a forma mais frequente entre todos os tipos de movimento de massa. Apresentam superfícies de ruptura com forma planar associadas às heterogeneidades dos solos e rochas que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas derivadas de processos geológicos,

geomorfológicos ou pedológicos (Guidicini e Nieble, 1983; Fernandes e Amaral, 2004; Tominaga *et al.*, 2015).



Figura 12. Escorregamento Rotacional. (A) Localidade de Itacoatiara, Itapipoca; (B) Localidade de Itacolomy, Uruburetama. Fotos: Eduardo Freires.

Na Figura 14 pode ser observada a densidade de lineamentos na área de estudo. A maior densidade de lineamentos implica na ocorrência de um maior número de vertentes. Os setores onde os lineamentos estão mais adensados pode ser um indicativo da susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa. Todavia, observa-se que a deflagração de movimentos gravitacionais no Maciço de Uruburetama tem um forte componente humano.

Na vertente úmida esse fenômeno pode ser observado com maior frequência em virtude das características físicas que propiciam o desenvolvimento da atividade agrícola. A ocorrência de solos profundos e maiores índices pluviométricos favorecem a agricultura, porém as intervenções promovidas a partir dessa atividade funcionam como gatilhos que induzem o movimento de massa nas encostas, que podem ser intensificados a partir de abertura de estradas. Por outro lado, nos setores secos da serra onde as

condições do meio físico são mais limitantes, com solos rasos e menores índices pluviométricos, as atividades agrícolas influenciam na aceleração do processo erosivo, que por sua vez podem favorecer a movimentação de blocos estabilizados pelos sedimentos. O intemperismo físico é mais atuante na vertente seca, onde podem ser observados paredões e blocos rochosos, com morfologias diversas, expostos nas vertentes a partir da erosão diferencial. Este contexto implica numa dinâmica distinta, tendo a mecânica de rochas maior atuação nos movimentos gravitacionais nessa área, sendo predominante a ocorrência de queda de blocos e detritos.



Figura 13. Escorregamento translacional. (A) Localidade de Itacolomy, Uruburetama.; (B) Localidade de Água Fria, Uruburetama. Fotos: Eduardo Freires.

Sobre a ocorrências dessas estruturas Maia e Castro (2017) destacam que a existência de topografias elevadas no embasamento resulta da menor erosão em núcleos de maior resistência mecânica aos processos denudacionais, onde a dificuldade se deve, principalmente, às características litológicas, faciológicas, petrográficas e estruturais que se somam a fim de aumentar ou diminuir a coesão físico-química da rocha frente à meteorização.

Em áreas com deficiência hídrica há o predomínio do intemperismo mecânico, pois falta água e ácidos (provenientes de organismos) para que ocorra reações químicas mais rápidas. A desagregação das rochas ocorre por meio da intensidade da insolação e suas conseqüentes variações diurnas e noturnas de temperatura sobre

os afloramentos rochosos. Dependendo da natureza das rochas e de suas estruturas e texturas, os afloramentos rochosos intemperizados fornecem proporções variadas de detritos. (Ribeiro, *et al.*, 2010; Abner, *et al.*, 2019).

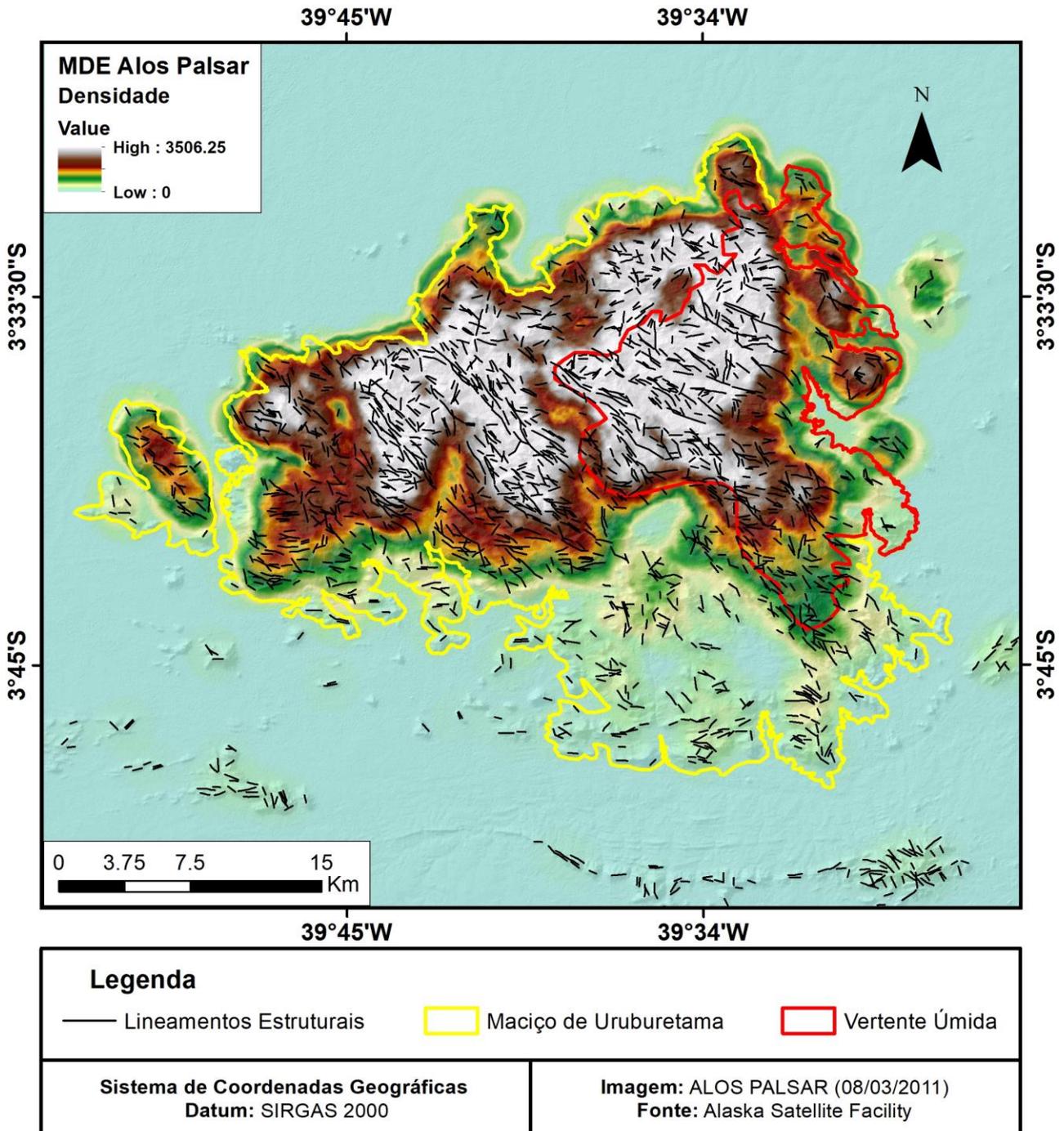


Figura 14. Densidade dos lineamentos estruturais do Maciço de Uruburetama/CE.

O diagrama de roseta na Figura 15 indica a orientação dos lineamentos topográficos do Maciço de Uruburetama. Como pode ser observado há uma preponderância de lineamentos com orientação no *trend* NW-SE. Isto indica que a maior parte das vertentes estão dispostas a

nordeste, a barlavento do maciço, e a sudoeste, a sotavento do maciço. A partir dessa compreensão é possível inferir que tais setores são prevalentes para ocorrência dos movimentos de massa.

Os condicionantes atuantes para ocorrência dos movimentos de massa nos dois

setores apresentam intensidade distintas e podem ocorrer em virtude das características ambientais dominantes de cada área ou em decorrência do uso e ocupação do solo efetivado sem planejamento ou técnicas adequadas.

Os lineamentos extraídos de forma automática, analisados em conjunto com as características ambientais dominantes nas vertentes do Maciço de Uruburetama, se apresentaram como um importante instrumento para identificação de áreas susceptíveis a ocorrência de movimentos gravitacionais. A distribuição, densidade e orientação dos lineamentos pode ser um recurso para subsidiar o monitoramento de encostas propícias a deflagração de movimentos de massa.

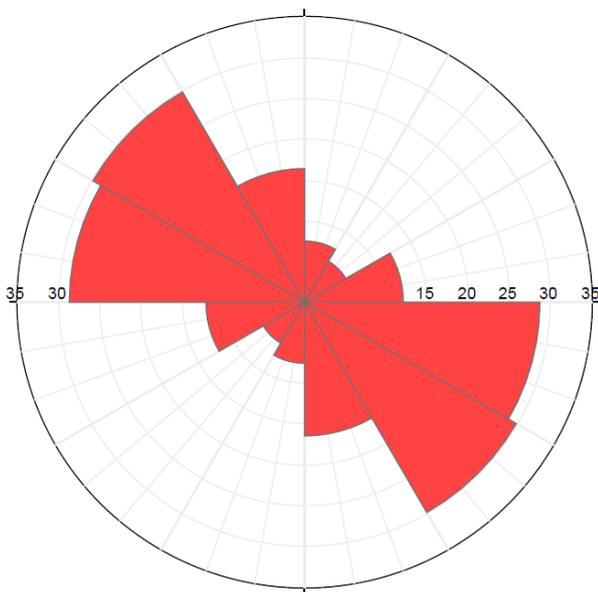


Figura 15. Distribuição da frequência de orientação dos lineamentos extraídos na área em estudo.

### Considerações Finais

Os lineamentos, obtidos de forma automática a partir do MDE ALOS PALSAR, permitiram avaliar a influência dos trends estruturais no desencadeamento dos movimentos de massa.

A partir do mapa de densidade de lineamentos foi possível identificar quais áreas eram mais propícias a deflagração dos movimentos de massa, tendo em vista que as áreas com relevo mais recortado implicam na ocorrência de mais cristas, colinas, vales e consequentemente em mais vertentes expostas aos agentes intempéricos e às intervenções humanas.

Da mesma forma, ao identificar a orientação principal dos lineamentos estruturais, foi possível compreender qual a disposição das vertentes aos condicionantes que favorecem a

erosão e ao intemperismo e induzem os movimentos de massa. Tendo os setores nordeste e sudoeste do maciço maior tendência a ocorrência desses eventos.

Ao analisar os produtos gerados em conjuntos com as características ambientais do Maciço de Uruburetama, compreende-se que ocorrem dinâmicas diferentes em suas encostas. Os condicionantes deflagradores de movimentos de massa nos setores úmido e seco da serra atuam com intensidades diferentes e geram processos distintos.

Enquanto na vertente úmida são observados maiores índices pluviométricos e consequentemente solos profundos, na vertente seca ocorre baixas média de chuvas e solos rasos. Essas particularidades acarretam na predominância de escorregamentos do tipo rotacional e translacional na vertente úmida e em queda de blocos e detritos ou tombamentos na vertente seca.

Todavia, observa-se que os movimentos de massa no maciço são potencializados pelas atividades humanas. Na vertente úmida a atividade agrícola praticada sem aplicação de técnicas adequadas e o corte de encostas para abertura de estradas funcionam como gatilhos para deflagração de escorregamentos. Na vertente seca a agricultura de subsistência, sobretudo o cultivo do milho, expõe os solos a erosão acelerada que, além de limitar a produção agrícola, induz a movimentação de blocos rochosos estabilizados pelos sedimentos. Observa-se que na vertente úmida há um forte componente humano na deflagração dos movimentos. Os cultivos e a abertura de estradas são uma combinação propícia a deflagração de escorregamentos. Na vertente seca o intemperismo físico é mais atuante, em virtude do processo de erosão diferencial que atuou nas encostas expondo blocos e paredões rochosos. Neste caso há o predomínio da mecânica de rochas, sendo mais comuns movimentos como quedas de blocos e detritos ou tombamentos.

A extração automática de lineamentos demonstrou ser um excelente recurso para identificação de áreas com maior susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa, seja a partir de sua distribuição, ou da análise de densidade e orientação dessas estruturas. Os lineamentos extraídos de forma automática constituem um ótimo instrumento para o monitoramento das encostas que abrigam condições favoráveis para a deflagração de movimentos de massas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e a Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido; e ao Programa de Pós-graduação em Geologia da UFC pelo incentivo a esta pesquisa.

## Referências

- 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 (Online)* 15, 949 – 957.
- Cordeiro, A.M.N., Carvalho, I.P., Bastos, F.H. Lima, D. L.S., 2019. O papel das estruturas litológicas na dinâmica e evolução do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista da Casa da Geografia de Sobral (Online)* 21, 81-93.
- Bastos, F.H., 2012. Movimentos de massa no maciço de Baturité e contribuições para estratégias de planejamento ambiental. Tese (Doutorado). Fortaleza, UFC.
- Batista, C.T., Verissimo, C.U.V., Amaral, W.S., 2014. Levantamento de feições estruturais lineares a partir de sensoriamento remoto – uma contribuição para o mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, Ceará. *Revista do Instituto de Geociências/ Geologia USP, Série Científica* 14, 67-82. DOI: 10.5327/Z1519-874X201400020004.
- Bitar, O.Y., 1995. Curso de Geologia aplicado ao meio ambiente. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo.
- Brandão, R.L., 2003. Zoneamento Geoambiental da região de Irauçuba/CE. Texto explicativo. Carta Geoambiental. CPRM, Fortaleza.
- Brandão, R.L., Freitas, L.C.B., 2014. Geodiversidade do estado do Ceará. CPRM, Fortaleza.
- Brito, M.M., Weber, E.J., Krigger, V.S., Leitzke, F.P., 2016. Análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de porto alegre a partir de registros históricos análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de Porto Alegre a partir de registros históricos. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)* 68, 1853-1872.
- Dias, F.P., Herrmann, M.L.P., 2002. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC. *Revista Caminhos de Geografia (Online)* 3, 57-73.
- Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Medeiros, M.F., Paiva, I.G., 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará. 1 ed. Escala 1:500.000. CPRM, Fortaleza.
- Conceição, R.A.C., Silva, A.Q., 2013. Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, INPE, Foz do Iguaçu.* p.3688-3695.
- Falcão Sobrinho, J., Nascimento Neto, J.N., Falcão, C.L.C., 2019. Análise do uso e ocupação do solo em um ambiente úmido em meio ao semiárido cearense: Serra de Uruburetama. *Revista de Geociências do Nordeste (Online)* 5, 2447-3359. DOI: 10.21680/2447-3359.2019v5n0ID18430
- Fernandes, N.F., Amaral, C.P., 2004 Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. (Orgs.), *Geomorfologia e meio ambiente*, 5 ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp.123 – 194.
- Guerra, A.T., Guerra, A.J.T., 1997. Novo dicionário geológico-geomorfológico. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Guidicini, G., Nieble, C.M., 1983 Estabilidade de taludes naturais e de escavações. 2 ed. Blucher, São Paulo.
- Guimarães, R.F., Carvalho Júnior, O.A.; Gomes, R.A.T.; Fernandes, N.F., 2008. Movimentos de massa. In: Florenzano, T.G. (org.), *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.* Oficina de textos, São Paulo, pp.159 -184.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Portal das cidades: panorama/ população. Brasília. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso: 28 out. 2018.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas., 1991. Ocupação de encostas. IPT, São Paulo.
- Jorge, M.C.O., Guerra, A.J.T., 2013. Erosão dos solos e movimentos de massa: recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. In: Guerra, A J.T; Jorge, M.C.O (Orgs.), *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas.* Oficina de textos, São Paulo, pp.7-30.
- Lima, D.L.S., Cordeiro, A.M.N., Bastos, F.H., 2015. Agentes condicionantes e desencadeadores de movimentos gravitacionais de massa na vertente úmida do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 1142-1157. DOI: 10.26848/rbgf.v8.4.p1142-1152.
- Lima, D.L.S., Cordeiro, A.M.N., Bastos, F.H., Maia, R.P., 2019. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 20, 373-395. DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1401.

- Lopes, M.F.L., 2017. Abordagem metodológica para extração de estruturas a partir de dados de radar (SRTM+) na região da jazida de P-U de Itataia-Ce. TCC (Graduação). Fortaleza, UFC.
- Lopes, M.F.L., Fontenele, G.B., Gameiro, S., Miranda, M.P., Duarte, C.R., Souto, M.V.S., 2017. Análise comparativa dos lineamentos da região da jazida fósforo-uranífera de Itataia-Ce gerados através do MDE: SRTM+, ASTER GDEM 2 e TOPODATA. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, João Pessoa. p.763-770. Internet. ISBN 978-85-17-00088-1. IBI: <8JMKD3MGP6W34M/3PS44NE>. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.23.17.13>. Acesso em: 2 mai. 2018.
- Loureiro, H.A.S., Ferreira, S.M., 2013. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In: Guerra, A J.T., Jorge, M.C.O. (Orgs.), Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. Oficina de textos, São Paulo, pp.95-125.
- Maia, R.P., Castro, H.S., 2017. Erosão Diferencial e Propriedades Geomorfológicas das Rochas- Exemplos do NE Brasileiro. Revista de Geociências do Nordeste (Online) 3, 1-15.
- Maia, R.P., Bezerra, F.H.R., 2014. Tópicos de Geomorfologia Estrutural – Nordeste Brasileiro. Edições UFC, Fortaleza.
- Oliveira, V.P.V., 2002. Prospección, caracterización y cartografía edafopaisagística em uma região montañosa del semiárido brasileiro: la Sierra de Uruburetama (Sertão Nordestino-Ceará-Brasil). Tese (Doutorado). Almeria, Universidad de Almeria.
- Penha, H.M., 2005. Processos endogenéticos na formação do relevo. In: Guerra, A.J.T.; CUNHA, S.B.C. (Orgs.), Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 6 ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro. pp.51-92.
- Penteado, M.M., 1983. Fundamentos de geomorfologia. 3 ed. IBGE, Rio de Janeiro.
- Ribeiro, S.C.; Marçal, M.S.; Corrêa, Antônio C.B., 2010. Geomorfologia de Áreas Semiáridas: Uma Contribuição ao Estudo dos Sertões Nordestinos. Revista de Geografia (Online) 27, 120-137.
- Riffel, E.S., Guasselli, L.A., Bressani, L.A., 2016. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. Boletim Goiano de Geografia (Online) 36, 285-101, DOI: [10.5216/bgg.v36i2.42796](https://doi.org/10.5216/bgg.v36i2.42796).
- Schobbenhaus, C., Neves, B.B.B., 2003. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. In: Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Orgs.), Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Brasília. pp. 5-54.
- Silva, M.V.C., 2007. Análise Geoambiental: subsídios ao planejamento agrícola da Serra de Uruburetama – Ce. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UECE.
- Souza, M.J.N., Oliveira, V. P. V., 2006. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste Brasileiro. Mercator (Online) 5, 85-102. DOI: [10.4215/RM0000.0000.0000](https://doi.org/10.4215/RM0000.0000.0000).
- Tominaga, L.K., Santoro, J., Amaral, R., 2015. Desastres naturais: conhecer para prevenir. 3 ed. Instituto Geológico, São Paulo.
- Tricart, J., 1977. Ecodinâmica. IBGE, Rio de Janeiro.