

DECLIVIDADE E DINÂMICA DOS RISCOS VULCÂNICOS NA ILHA DO HAVAÍ: CONTRIBUIÇÕES DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA DIGITAL

Thiago Bomjardim Porto ¹; Maria Giovana Parizzi ².

Resumo – O arquipélago do Havaí é composto por ilhas vulcânicas formadas pela atividade de pontos quentes, sendo a Ilha Grande a maior e mais jovem, constituída por cinco vulcões escudo sobrepostos. Os principais riscos geológicos da ilha estão associados aos fluxos de lava e ao colapso da zona costeira, ambos fortemente influenciados pela dinâmica do relevo local. Este estudo tem como objetivo mapear as classes de declividade e hipsometria da ilha para subsidiar a análise integrada dos riscos geológicos. A metodologia aplicou cartografia geotécnica digital em ambiente SIG, utilizando dados do USGS Earth Explorer (MDE SRTM 30x30m), reprojeto para o sistema EPSG:26905. A classificação da declividade seguiu a proposta da Embrapa (1979), estruturada em seis classes. O processamento incluiu a extração da declividade, agrupamento por classes, recorte por limites da ilha e dos vulcões, e a elaboração do mapa final. Os resultados indicaram que a Ilha Grande apresenta, majoritariamente, relevo suave, com predominância das classes plano, suave-ondulado e ondulado. A análise integrada demonstrou que as áreas de maior declividade coincidem com zonas de risco elevado de fluxo de lava e com as regiões costeiras mais vulneráveis ao colapso, especialmente nas frentes de lava associadas aos vulcões Kīlauea e Mauna Loa. Conclui-se que a declividade constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação dos riscos naturais da ilha, contribuindo para o planejamento e a gestão territorial em cenários de vulnerabilidade geológica.

Abstract –The Hawaiian Archipelago consists of volcanic islands formed by hotspot activity, with the Big Island being the largest and youngest, composed of five overlapping shield volcanoes. The island's main geological hazards are related to lava flows and coastal zone collapse, both strongly influenced by local topography dynamics. This study aims to map the slope and hypsometric classes of the island to support an integrated analysis of geological risks. The methodology involved digital geotechnical mapping in a GIS environment, using data from the USGS Earth Explorer (SRTM DEM 30x30m), reprojected to the EPSG:26905 coordinate system. Slope classification followed the framework proposed by Embrapa (1979), structured into six classes. The workflow included slope extraction, class grouping, clipping by island and volcano boundaries, and final map generation. The results indicated that the Big Island is predominantly characterized by gentle relief, mainly composed of flat, gently undulating, and undulating classes. The integrated analysis demonstrated that areas of steeper slopes coincide with high-risk lava flow zones and the most vulnerable coastal sectors, especially along lava fronts associated with Kīlauea and Mauna Loa volcanoes. The study concludes that slope, combined with hypsometric analysis, is a fundamental tool for assessing natural hazards on the island, contributing to territorial planning and risk management in geologically vulnerable scenarios.

Palavras-Chave – Geoprocessamento; SIG; Havaí; Declividade; Riscos Geológicos.

¹ Engenheiro Civil, PhD, Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGeol IGC UFMG), (31) 98825-8708, thiagoportoeng@gmail.com

² Geóloga, PhD, Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGeol IGC UFMG), (31) 3409-5424, mgparizzi18@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O Arquipélago do Havaí é composto por cadeias paralelas e lineares de ilhas vulcânicas e montes submarinos que começaram a se formar há mais de 70 milhões de anos, desde o Terciário até o Recente. Localizado no Oceano Pacífico Norte, o arquipélago se estende por aproximadamente 2.400 km, tendo início na Ilha Grande do Havaí, denominada em inglês como Hawaii Island (USGS, 2025), Figura 1.

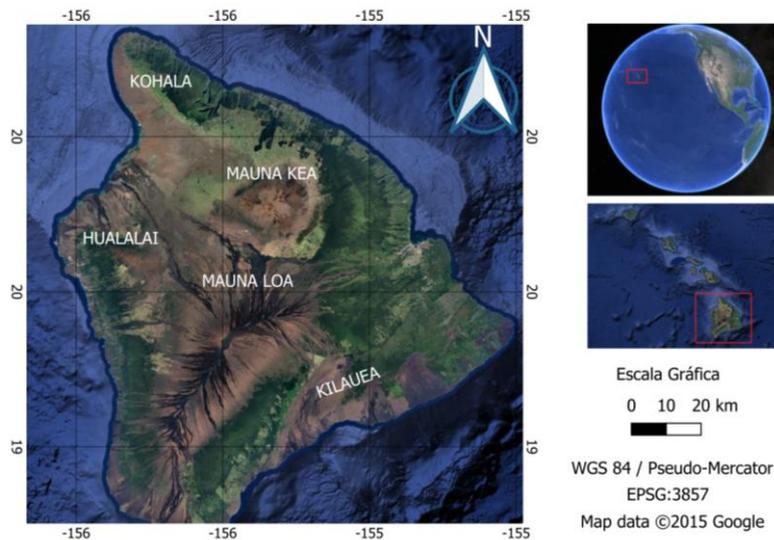


Figura 1. Localização da área de estudo.

As ilhas havaianas formaram-se sobre um hot spot fixo, com a movimentação da Placa do Pacífico no sentido SE-NW originando uma cadeia linear de vulcões (USGS, 2025), como mostrado na Figura 2.

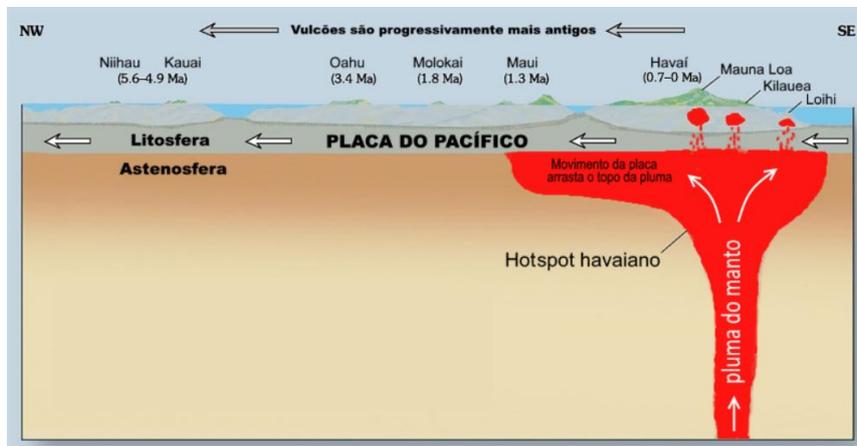


Figura 2. Representação esquemática da formação das ilhas vulcânicas do estado do Havaí.

Fonte: Adaptado de USGS (2006). <https://pubs.usgs.gov/imap/2800/>

Esse processo deu origem a uma sequência de ilhas com idades geológicas distintas, sendo a Ilha Grande a mais jovem e geologicamente ativa, enquanto as ilhas mais antigas, como Kauai, apresentam relevo mais erodido e são cercadas por recifes de coral. A Ilha Grande ocupa uma área aproximada de 10.432 km² e foi formada pela sobreposição de cinco grandes vulcões escudo: Kohala, Mauna Kea, Hualālai, Mauna Loa e Kīlauea. Destes Mauna Loa e Kīlauea permanecem em atividade, ambos localizados no Parque Nacional dos Vulcões do Havaí (Sinton e Sherrod, 2021). Esses vulcões são caracterizados por encostas suaves, resultado da baixa viscosidade da lava basáltica, pobre em sílica, que favorece o escoamento da lava por extensas áreas antes da solidificação, Figura 3. Essa característica geomorfológica contribui para declividades menos acentuadas em grande parte da ilha (National Park Service, 2024).



Figura 3. Relevo de vertentes com declividade suave típico da maior parte da Ilha Grande devido aos derrames de lava mais fluida Foto: Maria Giovana Parizzi.

Este artigo tem como objetivo realizar o mapeamento das classes de declividade e da hipsometria da Ilha Grande do Havaí, buscando correlacioná-las às zonas de fluxos de lava e às áreas vulneráveis ao colapso da zona costeira. A declividade é reconhecida como um dos principais fatores condicionantes em diversas análises ambientais que envolvem a modelagem espacial da paisagem, como estudos geomorfológicos, de inundações, de incêndios florestais, movimentos de massa, propagação de fluxos de lava e processos gravitacionais em ilhas vulcânicas. Estudos recentes reforçam a importância dessa variável na análise de deslizamentos, como demonstrado por Porto *et al.* (2024) e Silva (2024).

2. CARACTERIZAÇÃO DOS RISCOS GEOLÓGICOS NA ILHA GRANDE ASSOCIADOS ÀS ATIVIDADES VULCÂNICAS

O vulcão Kīlauea, considerado um dos mais ativos do mundo, e o Mauna Loa, o maior vulcão terrestre em volume, são os principais modeladores da paisagem da Ilha Grande do Havaí. O solo predominante da ilha é de natureza basáltica, resultante das sucessivas erupções desses vulcões. Nas áreas mais afastadas das zonas de atividade vulcânica, os terrenos revelam alta fertilidade, favorecendo a prática agrícola local.

Com uma população estimada em 200.629 habitantes (U.S. Census Bureau, 2022), a Ilha Grande apresenta baixa densidade demográfica, de aproximadamente 19,2 habitantes por quilômetro quadrado. Os principais centros urbanos são Hilo, sede administrativa do condado, e Kailua-Kona, reconhecida como polo turístico e econômico da região. Grande parte do território permanece desabitado, em razão da presença dominante das formações vulcânicas e de extensas áreas protegidas.

Segundo a Encyclopedia Britannica (2023), as maiores elevações da Ilha Grande coincidem com os picos dos vulcões que a constituíram. Suas altitudes são: Kohala (1.670 metros), Mauna Kea (4.205 metros), Hualālai (2.521 metros), Mauna Loa (4.169 metros) e Kīlauea (1.247 metros). A Figura 4 ilustra o relevo da ilha, destacando a distribuição geográfica dos vulcões que deram origem à sua morfologia atual.

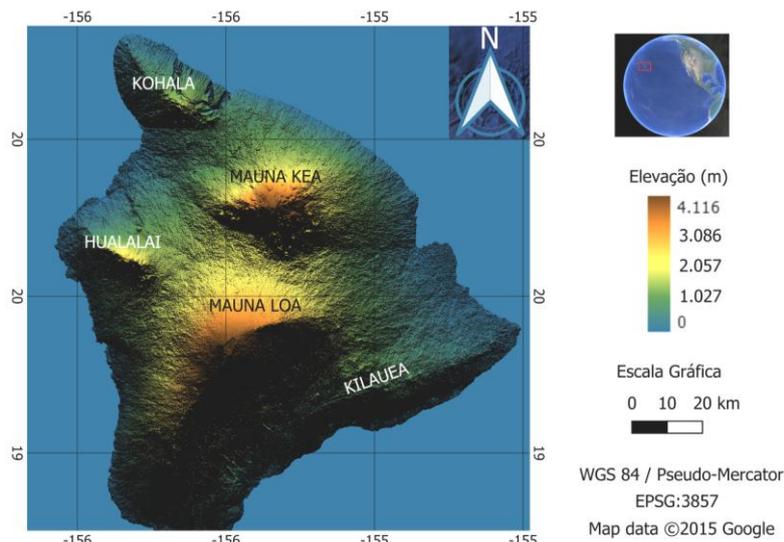


Figura 4. Modelo Digital de Terreno sombreado com a representação do relevo da Ilha "Grande".
(Elaborado pelos autores)

2.1. Risco associado a fluxo de lava

A Ilha Grande do Havaí está entre as regiões do mundo com maior risco associado a fluxos de lava, devido à intensa atividade dos vulcões Mauna Loa e Kīlauea, reconhecidos como os mais ativos do arquipélago. Segundo o USGS (2017), as áreas de maior perigo concentram-se nas proximidades das cristas vulcânicas e nas zonas de rift, onde a presença de fissuras facilita a extrusão de magma, Figura 5(a). Nessas regiões, os fluxos de lava podem se deslocar rapidamente, cobrindo extensas áreas em poucas horas ou dias. Esse avanço é ainda mais acelerado em terrenos com maior declividade, que favorecem o escoamento da lava em direção a zonas habitadas e a infraestruturas críticas (Figura 5b). A elevada fluidez da lava basáltica havaiana contribui para a formação de fluxos longos e relativamente rápidos, ampliando a abrangência dos eventos eruptivos (USGS, 2023). Além da ameaça direta às comunidades, os fluxos de lava representam um perigo significativo à mobilidade na ilha, podendo interromper rodovias e isolar populações locais. De acordo com USGS (2025) o Serviço Geológico Americano desenvolveu um sistema de mapeamento de zonas de risco que divide a Ilha Grande em nove categorias, baseadas na frequência histórica de fluxos de lava e nas condições naturais de proteção oferecidas pela topografia. Áreas como as encostas do Mauna Loa e as zonas adjacentes aos rifts do Kīlauea são classificadas como de altíssimo risco, enquanto regiões mais afastadas ou protegidas pela própria configuração do relevo apresentam risco substancialmente reduzido. O monitoramento contínuo e a manutenção de planos de evacuação são fundamentais para mitigar a vulnerabilidade das populações diante desses riscos geológicos persistentes (USGS, 2023).



Figura 5 - Exemplo de atividade vulcânica no Havaí e de suas consequências: a) fluxo de lava na Ilha Grande; b) área atingida por fluxo de lava afetando moradias de uma vila e estruturas viárias." Foto: Maria Giovana Parizzi.

2.2. O Risco associado a colapso da zona costeira

Além dos riscos relacionados diretamente às erupções, a zona costeira da Ilha Grande, no Havai, apresenta elevado risco de colapso devido à instabilidade dos deltas de lava formados nas áreas de contato entre a lava e o oceano. Quando as correntes de lava atingem o mar, o resfriamento súbito provoca fragmentação da rocha e formação de estruturas frágeis e não consolidadas que compõem os deltas, Figura 6. Essas plataformas recém-formadas, apesar de parecerem sólidas, são extremamente instáveis e propensas a colapsos catastróficos. O peso acumulado do material e a contínua adição de lava fresca aumentam o risco de desabamento repentino, podendo desencadear explosões de vapor e projeção de fragmentos rochosos.

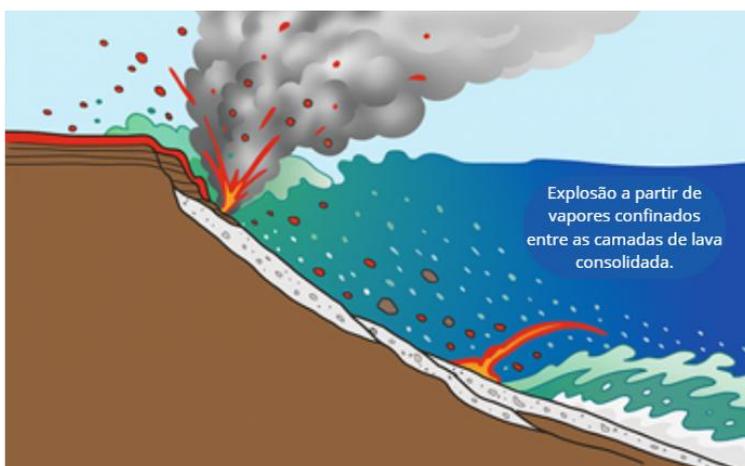


Figura 6. Formação do delta de lava com destaque para a interação da lava com a água do oceano e colapso da área costeira. Fonte: Adaptado de USGS (2023).

À medida que os deltas de lava se expandem sobre declividades subaquáticas acentuadas, aumentam as chances de que grandes seções se desprendam e colapsem no oceano profundo. Esse processo, além de gerar explosões térmicas intensas, pode provocar ondas perigosas e liberar nuvens de vapor tóxico, representando ameaça significativa para as pessoas que se aproximam dessas áreas costeiras, Figura 7. A composição basáltica da lava da Ilha Grande, mais fluida e de rápida propagação, contribui para a formação contínua desses deltas, mas não impede sua vulnerabilidade estrutural. Trusdell e Zoeller (2017) fizeram o mapa de inundação de lava para o vulcão Mauna Loa, sendo este documento identificado como o mais atualizado, até então. A lava que entra no mar cria um conjunto específico de riscos que já feriram gravemente ou mataram pessoas desavisadas, inquietos para ver de perto a interação entre lava quente e água fria. Não se pode prever o momento ou o tamanho do colapso de um delta de lava (USGS, 2023).



(a)



(b)

Figura 7. Exemplo do relevo e vulcanismo associado a ocorrência de colapso de áreas (bordas) costeiras no Havai. a) escarpa típica da zona costeira; b) correntes de lava atingindo o mar, com potencial para a ocorrência de colapsos catastróficos nessas áreas. Foto: Maria Giovana Parizzi.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, foi realizado um levantamento de dados públicos provenientes da base de dados disponibilizada no “*USGS Earth Explore*” que é uma ferramenta do Serviço Geológico dos Estados Unidos que permite pesquisar, visualizar e baixar dados geoespaciais. Resumidamente, as principais etapas, técnicas e procedimentos adotados na pesquisa foram:

- (a) obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) do programa SRTM (30x30);
- (b) análise da consistência e qualidade do banco de dados disponível para a pesquisa;
- (c) reprojeção do MDE para o EPSG:26905 - NAD83 / UTM zone 5N;
- (d) criação do atributo matricial declividade (.tif);
- (e) agrupamento dos valores de declividade de acordo com as classes definidas pela Embrapa (1979) que divide o relevo em seis classes distintas, a saber: plano (0 a 3%), suave-ondulado (3 a 8%), ondulado (8 a 20%), forte-ondulado (20 a 45%), montanhoso (45 a 75%) e escarpado (> 75%). Para tanto, utiliza-se da cartografia geotécnica digital em ambiente SIG para realização do mapeamento da declividade utilizando-se dados de acesso livre. O Programa gratuito utilizado no trabalho foi o QGIS, versão 3.34.;
- (f) recorte do plano de informação de acordo com o limite territorial da ilha Havaí;
- (g) extração da área por classe de declividade;
- (h) obtenção e edição do mapa de vulcões e de zonas de risco associado a fluxo de lava (.shp);
- (i) recorte do mapa de declividade considerando o limite estimado por vulcão (5x);
- (j) extração da área por classe de declividade considerando a contribuição de cada vulcão;
- (k) elaboração, edição e publicação do mapa de declividade da ilha Havaí (.tif);
- (l) elaboração, edição e publicação do mapa com as zonas de risco associado a fluxo de lava (.tif);
- (m) elaboração de tabelas com a classificação por unidade de área das classes de declividades e sua relação com as zonas de risco associado a fluxo de lava. Elaboração de tabela com as características do relevo da ilha Havaí considerando-se as zonas de risco associado a fluxos de lava.
- (n) discussões complementares sobre os resultados obtidos e a limitação da pesquisa.
- (o) elaboração das principais conclusões da pesquisa e sugestão de trabalhos futuros.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 8 apresenta o mapa de declividade da Ilha Grande do Havaí, elaborado no software QGIS. A análise gráfica evidencia que, de forma geral, a ilha possui relevo predominantemente suave, com classes que variam entre plano, suave-ondulado e ondulado, conforme a classificação proposta pela Embrapa (1979).

A Tabela 1 sintetiza, em valores arredondados, os resultados das classes de declividade por unidade de área (km²) na Ilha Grande do Havaí, incluindo a análise detalhada das subdivisões correspondentes aos cinco vulcões que a compõem: Kohala, Mauna Kea, Hualālai, Mauna Loa e Kīlauea. Considerando as características geológicas locais, observa-se que, em praticamente todas as regiões da ilha, predomina a declividade na faixa de 3% a 8%, classificada como suave-ondulada segundo a categorização da Embrapa (1979).

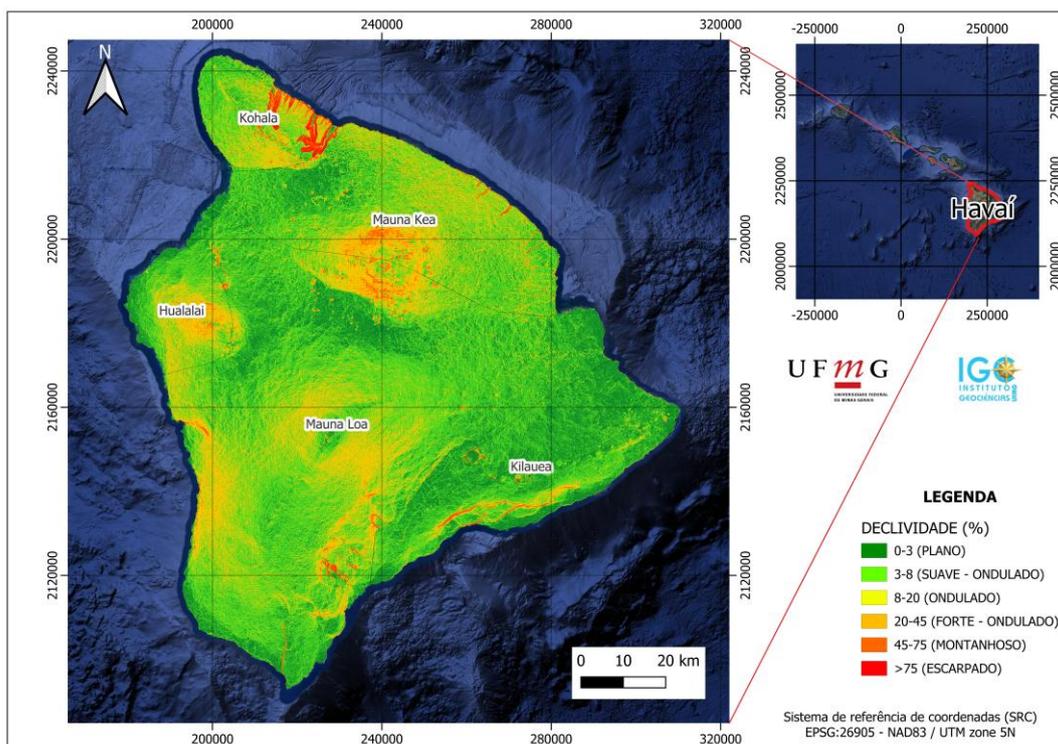


Figura 8. Mapa de Declividade da ilha Havaí – EUA.
 Fonte: MDE – SRTM (30x30); Imagem de fundo - Google Satélites.

Tabela 1. Classificação por unidade de área das classes de declividades da ilha Havaí - EUA.

Abrangência Territorial	Classes de declividade (%)												Total	
	Plano (0 - 3)		Suave - ondulado (3 - 8)		Ondulado (8 - 20)		Forte - ondulado (20 - 45)		Montanhoso (45 - 75)		Escarpado (>75)			
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Havaí	2.571	25	5.195	50	2.451	23	184	2	30	0	1	0	10.432	100
Kohala	58	10	281	47	186	31	45	8	26	4	1	0	597	6
Mauna Kea	325	17	941	50	579	31	47	2	1	0	0	0	1.894	18
Hualalai	87	16	239	44	203	37	12	2	0	0	0	0	540	5
Mauna Loa	1.359	23	3.112	53	1.386	23	62	1	2	0	0	0	5.921	57
Kilauea	735	50	633	43	95	6	16	1	1	0	0	0	1.479	14

Uma exceção ao padrão geral da ilha é a área correspondente ao vulcão extinto Kohala, que abrange aproximadamente 71,8 km², cerca de 12% da sua extensão, caracterizada por classes de declividade superiores a 20%, incluindo as categorias de forte-ondulado, montanhoso e escarpado. Ressalta-se, entretanto, que o mapeamento das classes de declividade foi baseado no Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado do programa SRTM, com dados reamostrados pelo USGS Explorer, cuja resolução de 30x30 metros pode limitar a precisão da análise, especialmente em áreas com alta variação topográfica.

Apresenta-se na Figura 9 o mapa de zonas de risco associados a fluxo de lava - Ilha Havaí (EUA). Graficamente, percebe-se que, de maneira geral, a região no entorno dos vulcões Mauna Loa e Kilauea estão mais suscetíveis a erupções vulcânicas. O mapa foi desenvolvido pela equipe de técnicos da USGS em 1991 com o objetivo de zonear espacialmente o risco associado a fluxo de lava com base na localização de aberturas eruptivas, cobertura de lava anterior e topografia. A leitura comparativa dos mapas revela uma associação direta entre as áreas de maior declividade e as zonas classificadas como de maior risco associando a fluxo de lava. Observa-se que as encostas dos vulcões Mauna Loa e Kilauea, que concentram as zonas 1 e 2 de risco elevado, coincidem com as áreas de declividade mais acentuada, identificadas no mapa de declividade pelas cores laranja e vermelha (declividades superiores a 20%).

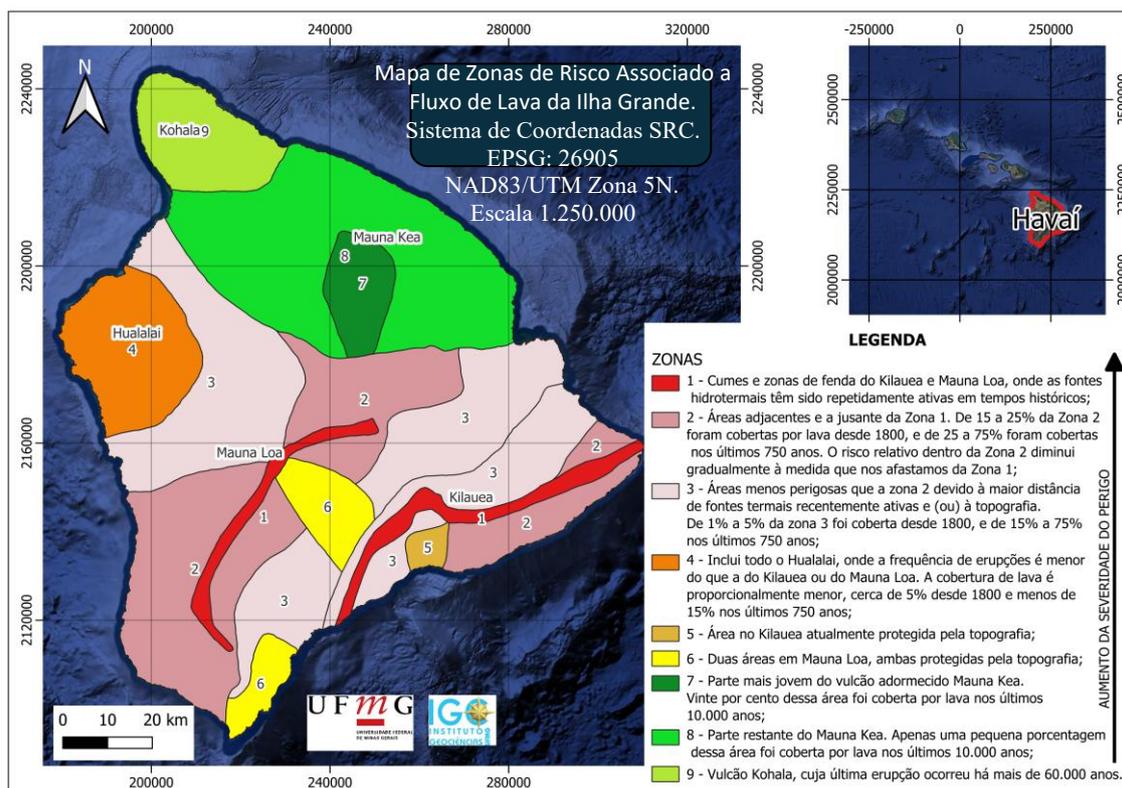


Figura 9. Mapa de zonas de risco associado a fluxo de lava – Ilha Grande - Havaí (EUA).
 Fonte: USGS (1991); Imagem de fundo - Google Satélites.

Essas áreas correspondem às vertentes ativas dos vulcões escudo, onde as fissuras e zonas de rift facilitam a emissão de fluxos de lava que se propagam rapidamente, especialmente devido à contribuição do relevo inclinado que acelera o escoamento da lava basáltica. Nas regiões centrais da ilha, que abrangem parcialmente os domínios do Mauna Kea e do Hualālai, predomina uma declividade suave, com predominância das classes entre 3% e 8% (suave-ondulado), coincidindo com zonas de risco intermediário abaixo (zonas 4 a 7). Essas áreas, devido à menor inclinação e à distância das fontes ativas de emissão de lava, apresentam riscos mais moderados. Vale destacar que, embora o Mauna Kea tenha 20% de sua área coberta por fluxos de lava nos últimos 10.000 anos (zona 7), o relevo menos acidentado e a inatividade recente reduzem significativamente sua vulnerabilidade atual. Já as áreas mais distantes dos centros eruptivos, especialmente no domínio do Kohala, onde predominam as zonas 8 e 9 de risco muito baixo ou praticamente inexistente, são caracterizadas por relevo suave a moderado, mas com presença de algumas porções mais íngremes devido ao processo erosivo sobre o antigo vulcão extinto. Apesar da declividade local mais elevada em certos trechos, a ausência de atividade vulcânica recente contribui para que a região seja classificada como de baixo risco.

A Tabela 2 apresenta resumidamente, em números arredondados, os resultados obtidos da classificação pelas nove zonas de risco associado a fluxo de lava estabelecidas pela USGS (1991) função das declividades da ilha Grande Havaí - EUA. Em função das características geológicas locais, percebe-se que a ilha, independente de qual zona, é predominantemente com declividade entre 3 a 8%, cuja classe, de acordo com a categorização feita pela Embrapa (1979) é Suave-ondulado. A constatação de que a declividade é “suave” justifica-se pela presença de vulcões do tipo Escudo na ilha. Os vulcões Escudo são resultado de atividades vulcânicas em locais de lavas mais fluidas, portanto, com menores viscosidades. No entanto, eles podem ter cones de alta elevação, mas com rampas suaves em termos de declividade. A Tabela 3 apresenta resumidamente, em números arredondados, os resultados obtidos das características geomorfológicas da ilha Grande, considerando-se as zonas de risco associado a fluxos de lava, bem como considerando os cinco vulcões que formaram a ilha (Kohala, Mauna Kea, Hualalai, Mauna Loa, Kilauea). Em função das características geológicas locais, percebe-se que o trecho da ilha com menor declividade (zona 7) corresponde a região da “caldeira” do Mauna Kea.

Tabela 2. Classificação por zona de risco associado a fluxo de lava das classes de declividades da Ilha Grande, Havaí - EUA.

Zonas de Risco*	Classes de declividade (%)												Total	
	Plano (0 - 3)		Suave-ondulado (3 - 8)		Ondulado (8 - 20)		Forte-ondulado (20 - 45)		Montanhoso (45 - 75)		Escarpado (>75)			
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
1	180	38	233	50	51	11	4	1	0	0	0	0	468	4
2	558	23	1341	54	549	22	13	1	0	0	0	0	2462	24
3	1106	36	1548	50	431	14	20	1	2	0	0	0	3107	30
4	165	20	376	46	255	31	15	2	0	0	0	0	812	8
5	18	23	41	53	13	16	5	6	0	0	0	0	77	1
6	83	18	219	46	171	36	4	1	0	0	0	0	477	5
7	9	3	96	29	196	60	27	8	0	0	0	0	328	3
8	393	19	1067	51	593	28	49	2	1	0	0	0	2102	20
9	59	10	273	46	193	32	48	8	26	4	1	0	600	6
Resumo	2571	25	5195	50	2451	23	184	29	30	5	1	0	10432	100

* Zonas de Risco conforme descritas na Figura 9

Tabela 3. Características do relevo da ilha Grande considerando-se as zonas de risco associado a fluxos de lava.

Vulcão Associado	Zonas de Risco associado a fluxo de Lava	Altitude / Elevação (m)		Declividade do Terreno (%)	
		mínima	máxima	mínima	máxima
Mauna Loa e Kilauea	1	0,0	4159,0	0,0	63,0
	2	0,0	4050,0	0,0	58,0
	3	0,0	4113,0	0,0	61,0
Hualalai	4	0,0	2479,0	0,0	42,0
Kilauea	5	0,0	994,0	0,0	60,0
Mauna Loa	6	0,0	4025,0	0,0	41,0
Mauna Kea	7	1516,0	4198,0	0,0	39,0
	8	0,0	3924,0	0,0	58,0
Kohala	9	0,0	1629,0	0,0	79,0

Das nove zonas de risco associados a fluxos de lava analisadas, a única compreendida em sua totalidade no interior da ilha, portanto, sem contato com o oceano, é a zona 7 (sete). Em função disso, ao contrário das demais zonas pesquisadas a elevação mínima é diferente de 0 (zero), alcançando uma altitude inicial de 1.516m e uma altitude máxima de 4.198m, valores arredondados função da escala do mapeamento e tamanho do pixel. A análise do mapa evidencia que as áreas escarpadas, próximas à zona costeira, estão representadas pelas tonalidades laranja e vermelha, indicando declividades entre 20% e 75%. As regiões costeiras mais abruptas, particularmente aquelas influenciadas pelos fluxos de lava provenientes dos vulcões Kilauea e Mauna Loa, configuram-se como as zonas de maior probabilidade de colapso da borda litorânea, devido à combinação entre a morfologia acentuada e a dinâmica vulcânica ativa. Particularmente nas porções sudeste e sul da ilha, nas frentes litorâneas controladas pelo Kilauea e Mauna Loa, observa-se a sobreposição de áreas de elevada declividade com as zonas de deposição de fluxos de lava recentes. Essa configuração geomorfológica intensifica os riscos de colapsos costeiros súbitos, desencadeados pelo peso do material acumulado sobre encostas submarinas inclinadas e pela infiltração de água nas estruturas rochosas, que gera vaporização explosiva e desestabilização das margens. Já as porções associadas aos vulcões extintos, como Kohala e Mauna Kea, embora apresentem trechos localizados de elevada declividade, não possuem registros recentes de fluxos de lava, o que reduz consideravelmente o risco de colapso nessas áreas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados destacam a importância da cartografia geotécnica digital, com uso de SIG livre, na análise das declividades da Ilha Grande do Havaí. A integração entre o mapa de

declividade e o mapa de risco associado a fluxo de lava revelou uma correlação clara entre as áreas de maior declividade e as zonas classificadas como de risco elevado. As encostas mais inclinadas do Kīlauea e do Mauna Loa, identificadas pelas classes de forte-ondulado a escarpado, coincidem com as zonas críticas de fluxo de lava, onde a combinação entre relevo acentuado e atividade vulcânica intensa acelera a propagação dos fluxos. Essa relação evidencia que a declividade é um fator condicionante direto na dinâmica dos fluxos de lava na ilha, ampliando sua velocidade e alcance, e reforçando sua importância como ferramenta de previsão de riscos.

De modo similar, a análise integrada com as áreas propensas ao colapso da zona costeira demonstrou que as regiões costeiras mais escarpadas, especialmente nas frentes de lava ativa associadas ao Kīlauea e Mauna Loa, apresentam maior vulnerabilidade estrutural. Nessas zonas, a sobreposição de encostas abruptas e deposição recente de fluxos de lava sobre deltas instáveis acentua o risco de colapsos súbitos, potencializados pela interação entre a lava quente e o oceano. Apesar da robustez da análise, uma limitação importante do estudo reside na resolução espacial do modelo adotado (30x30 metros), que restringe a análise em escala de maior detalhe e pode influenciar na representação de microformas do relevo e na delimitação precisa das zonas de risco. Como proposta para futuras pesquisas, recomenda-se ampliar a modelagem SIG com a incorporação de outros produtos derivados do MDE, de curvatura do terreno (plano e perfil), direção das vertentes, unidades do relevo, índice de posição topográfica (TPI) e índice de rugosidade do terreno (TRI). Além disso, a integração de variáveis ambientais complementares, como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), mapas de uso e ocupação do solo, histórico de erupções vulcânicas e fluxos de lava, bem como dados de datação radiométrica, será essencial para uma compreensão mais abrangente da dinâmica morfológica da ilha.

REFERÊNCIAS

- EMBRAPA (1979) Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula da 10. Reunião técnica de levantamento de solos. Rio de Janeiro: Embrapa. 83 p. (SNLCS. Micelânea, 1).
- ENCYCLOPEDIA BRITANNICA (2023) *Hawaii Volcanoes National Park*, United States. Encyclopedia Britannica. Disponível em: <https://www.britannica.com/topic/Keck-Observatory>. Acesso em: 30 mar. 2025.
- NATIONAL PARK SERVICE (2024) *Volcano Types. Shield volcanoes*. National Park Service. Disponível em: <https://www.nps.gov/articles/000/shield-volcanoes.htm>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- PORTO, T. B.; SAMPAIO, J. L. D.; PARIZZI, M. G. (2024) *Cartografia Geotécnica Aplicada ao Estudo de Áreas Suscetíveis a Escorregamentos de Solos e Rochas em Belo Horizonte - MG*. In: COBRAMSEG 2024c, Balneário Camboriú. Anais... Balneário Camboriú: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 1-8. Disponível em: <https://cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- SILVA, D. F. S. (2024) *Proposta metodológica para a avaliação de suscetibilidade a escorregamentos: contribuições do aprendizado de máquina no município de Belo Horizonte, MG*. 405 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. SINTON, J. M.; SHERROD, D. R. (2021) *Geology of the Hawaiian Islands*, Editor(s): David Alderton, Scott A. Elias, Encyclopedia of Geology (Second Edition). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12513-8>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- TRUSDELL, F. A., ZOELLER, M. H. (2017) Lava inundation zone maps for Mauna Loa, Island of Hawai'i, Hawaii: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3387, 12 p., 10 sheets. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/sim3387>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- U.S. CENSUS BUREAU (2022) *State population by characteristics*. Washington, D.C.: U.S. Census Bureau. Disponível em: <https://www.census.gov>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- USGS (1991) *Volcano Lava Flow Hazard Zones*. United States Geological Survey. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/mfi/1992/2193/>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- USGS (2017) *Hawaiian Volcano Observatory*. Ocean Entry Hazards. United States Geological Survey. Disponível em: https://volcanoes.usgs.gov/observatories/hvo/hawaii_ocean_entry.html. Acesso em: 12 abr. 2025.
- USGS (2023) United States Geological Survey. Lava entering ocean gallery. Hawaiian Volcano Observatory. Disponível em: <https://www.usgs.gov/observatories/hvo/science/lava-entering-ocean>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- USGS (2025) *Geology of Hawai'i Volcanoes National Park*. Geology and Ecology of National Parks. United States Geological Survey. Disponível em: <https://www.usgs.gov/geology-and-ecology-of-national-parks/geology-hawaii-volcanoes-national-park>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- USGS (2006) United States Geological Survey. *Geologic Investigations Map I-2800: This Dynamic Planet*. World Map of Volcanoes, Earthquakes, Impact Craters, and Plate Tectonics. Third Edition. View prepared by Joel E. Robinson. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/imap/2800/TDPback.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2025.