

ANÁLISE DOS FATORES GEOMORFOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO NO HAITI: SUSCETIBILIDADE Á LIQUEFAÇÃO DO SOLO

Djimy Dolcin

Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: djimy.dolcin@yahoo.fr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2038-4163>

Rubson Pinheiro Maia

Professor de Geomorfologia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: rubsonpinheiro@yahoo.com.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1688-5187>

Sebastián Isaías Jorge Muñoz Vásquez

Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: geo.smunozv@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-6417>

Pedro Edson Face Moura

Doutor em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: pedroedson18@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3693-1280>

Mauricio Alejandro Perea Ardila

Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: mauricioapera@alu.ufc.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4561-0251>

Eliomara Leite Meira Gomes

Mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: eliomara1gomes@gamil.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3977-8575>

Antonia Beatriz Ferreira Andrade

Mestranda em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás (UFG)

Email: beatrizadrade501@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1982-6435>

Anna Sabrina Vidal de Souza

Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: annasabrinavidal@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5070-8208>

Kaio Victor Numes de Macedo

Graduando em Geografia na modalidade Licenciatura Plena na Universidade Federal do Ceará (UFC).

Email: victornumes1015@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8065-2098>

Recebido:02/26

Avaliado:05/26

Publicado:07/26

RESUMO

Em 12 de janeiro de 2010, a capital do Haiti, Porto Príncipe, foi destruída por um terremoto de magnitude Mw 7.0. Este terremoto revelou a intensidade da atividade neotectônica, a vulnerabilidade sísmica dos edifícios e fatores agravantes ligados à geomorfologia do Haiti. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é analisar como a

geomorfologia do Haiti pode potencializar os riscos gerados pela atividade sísmica (e.g. liquefação). Pesquisas bibliográficas das características geomorfológicas do Haiti, além da análise de dados Aster-Gdem e o contexto sísmico associado constituíram as etapas iniciais, o que permitiu integrar dados geomorfológicos com a intensidade dos efeitos gerados pela atividade sísmica. Para a realização do mapa de risco sísmico do Haiti à liquefação do solo, foi utilizada a análise multicritério em ambiente SIG, levando em conta a ameaça sísmica, a exposição populacional (concentração demográfica) e a suscetibilidade sísmica. Os resultados indicam que áreas de planícies aluviais não consolidadas apresentam maior risco devido à amplificação sísmica, enquanto regiões de declividade acentuada mostram menor suscetibilidade. O mapeamento da suscetibilidade sísmica revelou que aproximadamente 25% do território haitiano está altamente exposto, concentrando grande parte da população em áreas vulneráveis. Esses achados reforçam a necessidade de políticas de ordenamento territorial, adoção de técnicas de construção resilientes e implementação de estratégias de conscientização para reduzir a vulnerabilidade da população. O estudo destaca a importância da gestão integrada do risco sísmico à liquefação do solo, combinando conhecimento geotécnico e geomorfológico para subsidiar ações preventivas e políticas públicas. A disseminação de informações sobre a suscetibilidade sísmica do Haiti pode contribuir significativamente para a mitigação de desastres e a segurança da população.

Palavras-chave: Geomorfologia. Terremoto. Suscetibilidade. Liquefação do Solo. Risco Sísmico.

ANALYSIS OF GEOMORPHOLOGICAL FACTORS IN SEISMIC RISK ASSESSMENT IN HAITI: SUSCEPTIBILITY TO SOIL LIQUEFACTION

ABSTRACT

On January 12, 2010, Haiti's capital, Port-au-Prince, was devastated by an earthquake measuring Mw 7.0. This earthquake revealed the intensity of neotectonic activity, the seismic vulnerability of buildings, and aggravating factors linked to Haiti's geomorphology. In this regard, the objective of this article is to analyze how Haiti's geomorphology can exacerbate the risks generated by seismic activity (e.g., liquefaction). Literature reviews of Haiti's geomorphological characteristics, along with the analysis of Aster-Gdem data and the associated seismic context, constituted the initial stages, which allowed for the integration of geomorphological data with the intensity of the effects generated by seismic activity. To create the seismic risk map of Haiti for soil liquefaction, multi-criteria analysis was performed in a GIS environment, taking into account seismic hazard, population exposure (demographic concentration), and seismic susceptibility. The results indicate that areas of unconsolidated alluvial plains present a higher risk due to seismic amplification, while regions with steep slopes show lower susceptibility. Mapping of seismic susceptibility revealed that approximately 25% of Haitian territory is highly exposed, with a large portion of the population concentrated in vulnerable areas. These findings underscore the need for land-use planning policies, the adoption of resilient construction techniques, and the implementation of awareness-raising strategies to reduce the population's vulnerability. The study highlights the importance of integrated seismic risk management in relation to soil liquefaction, combining geotechnical and geomorphological knowledge to inform preventive measures and public policies. The dissemination of information on Haiti's seismic susceptibility can contribute significantly to disaster mitigation and public safety.

Keywords: Geomorphology. Earthquake. Susceptibility. Soil Liquefaction. Seismic Risk.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES GEOMORFOLÓGICOS EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN HAITÍ: SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACIÓN DEL SUELO

RESUMEN

El 12 de enero de 2010, la capital de Haití, Puerto Príncipe, quedó destruida por un terremoto de magnitud Mw 7,0. Este terremoto puso de manifiesto la intensidad de la actividad neotectónica, la vulnerabilidad sísmica de los edificios y los factores agravantes relacionados con la geomorfología de Haití. En este sentido, el objetivo de este artículo es analizar cómo la geomorfología de Haití puede potenciar los riesgos generados por la actividad sísmica (p. ej., la licuefacción). Las etapas iniciales consistieron en investigaciones bibliográficas sobre las características geomorfológicas de Haití, además del análisis de datos Aster-Gdem y el contexto sísmico asociado, lo que permitió integrar datos geomorfológicos con la intensidad de los efectos generados por la actividad sísmica. Para elaborar el mapa de riesgo sísmico de Haití frente a la licuefacción del suelo, se utilizó el análisis multicriterio en un entorno SIG, tomando en cuenta la amenaza sísmica, la exposición poblacional (concentración demográfica) y la susceptibilidad sísmica. Los resultados indican que las zonas de llanuras aluviales no consolidadas presentan un mayor riesgo debido a la amplificación sísmica, mientras que las regiones con pendiente pronunciada muestran una menor susceptibilidad. El mapeo de la susceptibilidad sísmica reveló que aproximadamente el 25 % del territorio haitiano está altamente expuesto, concentrando a gran parte de la población en áreas vulnerables. Estos

hallazgos refuerzan la necesidad de políticas de ordenamiento territorial, la adopción de técnicas de construcción resilientes y la implementación de estrategias de concientización para reducir la vulnerabilidad de la población. El estudio destaca la importancia de la gestión integrada del riesgo sísmico y la licuefacción del suelo, combinando conocimientos geotécnicos y geomorfológicos para respaldar las medidas preventivas y las políticas públicas. La difusión de información sobre la susceptibilidad sísmica de Haití puede contribuir significativamente a la mitigación de desastres y a la seguridad de la población.

Palabras Clave: Geomorfología. Terremoto. Susceptibilidad. Liquefacción del Suelo. Riesgo Sísmico.

ANALYSE DES FACTEURS GÉOMORPHOLOGIQUES DANS L'ÉVALUATION DU RISQUE SISMIQUE EN HAÏTI: SUSCEPTIBILITÉ À LA LIQUÉFACTION DES SOLS

RÉSUMÉ

Le 12 janvier 2010, la capitale d'Haïti, Port-au-Prince, a été détruite par un séisme d'une magnitude Mw 7,0. Ce séisme a mis en évidence l'intensité de l'activité néotectonique, la vulnérabilité sismique des bâtiments et les facteurs aggravants liés à la géomorphologie d'Haïti. Dans cette optique, l'objectif de cet article est d'analyser comment la géomorphologie d'Haïti peut amplifier les risques générés par l'activité sismique (par exemple, la liquéfaction). Des recherches bibliographiques sur les caractéristiques géomorphologiques d'Haïti, ainsi que l'analyse des données Aster-Gdem et du contexte sismique associé, ont constitué les étapes initiales, ce qui a permis d'intégrer les données géomorphologiques à l'intensité des effets générés par l'activité sismique. Pour réaliser la carte des risques sismiques d'Haïti liés à la liquéfaction des sols, une analyse multicritères a été effectuée dans un environnement SIG, en tenant compte de la menace sismique, de l'exposition de la population (concentration démographique) et de la susceptibilité sismique. Les résultats indiquent que les zones de plaines alluviales non consolidées présentent un risque plus élevé en raison de l'amplification sismique, tandis que les régions à forte pente affichent une moindre susceptibilité. La cartographie de la susceptibilité sismique a révélé qu'environ 25 % du territoire haïtien est fortement exposé, concentrant une grande partie de la population dans des zones vulnérables. Ces résultats soulignent la nécessité de mettre en place des politiques d'aménagement du territoire, d'adopter des techniques de construction résilientes et de mettre en œuvre des stratégies de sensibilisation afin de réduire la vulnérabilité de la population. L'étude met en avant l'importance d'une gestion intégrée des risques sismiques et de la liquéfaction des sols, combinant les connaissances géotechniques et géomorphologiques pour étayer les mesures préventives et les politiques publiques. La diffusion d'informations sur la vulnérabilité sismique d'Haïti peut contribuer de manière significative à l'atténuation des catastrophes et à la sécurité de la population.

Mots-clés: Géomorphologie. Séisme. Vulnérabilité. Liquefaction du Sol. Risque Sismique.

INTRODUÇÃO

Os terremotos são vibrações do solo, causados pela liberação repentina de energia acumulada na crosta terrestre ao longo de um plano de falha (LEONE, RICHMOND e VINET, 2010; ADAGUNODO e SUNMONU, 2015; DOLCIN, 2022). São um dos fenômenos naturais mais devastadores (OLUWAFEMI et al., 2018; GILLES et al., 2020). Os seus efeitos secundários associados são uma grande ameaça à sociedade, afetando milhares de pessoas e destruindo a infraestrutura em todo o mundo. (MEDDE, 2012; MALAKAR e RAI, 2023). Além de vibrações principais (LEONE, RICHMOND e VINET, 2010; OLUWAFEMI et al., 2018), as consequências de um terremoto podem ser tanto por causa de seus efeitos diretos, como amplificação local de efeitos pela topografia e geologia, quanto por causa de seus efeitos induzidos, como movimentos de massa e liquefação do solo (GILLES et al., 2020). Esse último efeito induzido consiste na perda de resistência ao cisalhamento devido ao aumento da pressão da água intersticial, desencadeado pelo abalo do solo provocado por terremotos (MEISINA et al., 2022; MAVROULIS e LEKKAS, 2026). Assim, a liquefação do solo ligada ao risco sísmico de refere-se à transformação repentina de um solo saturado de água num líquido fluido durante um terremoto (NURHACI, 2024). Neste contexto, a susceptibilidade à liquefação deve ser considerada uma componente crítica da avaliação do risco sísmico, e o seu mapeamento constitui um passo fundamental para a redução dos riscos sísmicos para as infraestruturas e as comunidades (MAVROULIS e LEKKAS, 2026).

Embora o mecanismo responsável pela ocorrência dos fenômenos de liquefação seja o mesmo, a sua manifestação à superfície apresenta uma variedade considerável. Incluem várias características e processos geomorfológicos, tais como ejeções de areia, fluxos de lama, deslizamentos laterais, recalque diferencial por contração seguida de expansão, recalque por compressão, recalque de taludes rochosos e fraturados, colapso (GILLES et al., 2020; MAVROULIS e LEKKAS, 2026).

De acordo com a Unidade Técnica e Sísmica (2022), o Serviço Sísmico Nacional (BME/UTS, 2022), foram detetados dezenas de sismos no Haiti nos últimos 10 anos. Em 12 de janeiro de 2010, às 21:53:10 UTC (16:53:10 hora local), a Falha Enriquillo-Plantain Garden (EPGF) rompeu após 240 anos de inatividade com magnitude estimada de Mw 7.0 (FRITZ et al., 2012; GORUM et al., 2013; DOLCIN, 2022). Durante esse evento, teve muitos movimentos de massa na região do sul. A maioria deles era composta de movimentos lentos (planares ou curvos) e movimentos rápidos (queda de rochas, fluxos rápidos de detritos), reativados por chuvas intensas ou movimentos sísmicos (MORA-CASTRO et al., 2012; AZZURRA, 2012). Além disso, durante o terremoto, várias áreas costeiras, especialmente nas desembocaduras dos rios, desabaram devido a fenômenos de liquefação (AZZURRA, 2012).

Este fenômeno sísmico não foi o primeiro grande evento no Haiti que teve liquefação do solo, um país que já foi atingido por sismos significativos como os efeitos induzidos (e.g. liquefação do solo), como o de 1842 em Cabo-Haitiano e o de 1887 em Mole Saint-Nicolas (GILLES et al., 2020).

Neste contexto, a integração da geomorfologia, ou seja, dos fatores geomorfológicos na avaliação de riscos sísmicos parece ser uma necessidade fundamental para a adaptação de edifícios de acordo com o relevo. Entre as consequências provocadas pelos terremotos, a liquefação dos solos soltos merece uma atenção especial. Consequentemente, os principais fatores geomorfológicos fundamentais neste estudo são: (1) condições do subsolo, caracterizadas pelas unidades litológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e Vs30 (velocidade média de propagação das ondas de cisalhamento nos primeiros 30 metros), e (2) topografia, caracterizada pela declividade, utilizando-se a análise multicritério simples (álgebra de mapas) para a realização do mapa de suscetibilidade sísmica à liquefação do solo no Haiti. Quanto ao mapa de risco sísmico à liquefação do solo, visa fornecer aos atores da gestão de riscos informações para elaboração de políticas públicas de ordenamento territorial. Em outras palavras, o mapeamento do risco sísmico à liquefação do solo está entre as soluções para compreender e prever perigos futuros, a fim de mitigar as suas consequências.

No Haiti, os fatores geomorfológicos que favorecem a ação das ondas sísmicas ainda são pouco estudados, por isso é necessário ampliar as pesquisas que analisem a interação entre as características do relevo com a intensidade sísmica. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar como a geomorfologia do Haiti pode potencializar os riscos gerados pela atividade sísmica (e.g. liquefação do solo).

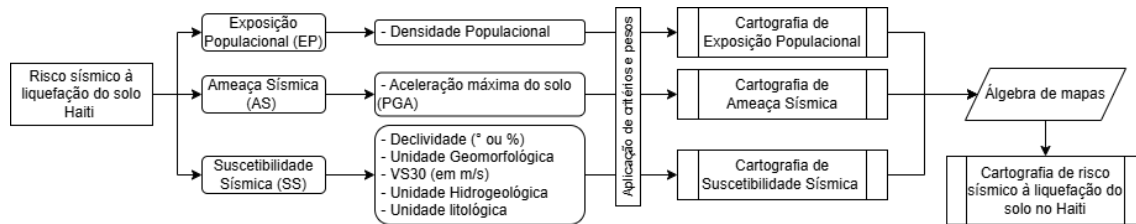
METODOLOGIA

Procedimentos metodológicos

Para atingir o objetivo deste trabalho, a metodologia de pesquisa adotou uma abordagem quantitativa, complementada com uma análise interpretativa da geomorfologia e do risco sísmico à liquefação do solo no Haiti. Deste modo, além da descrição da área de estudo, o processo metodológico foi estruturado em quatro etapas principais: i) Revisão bibliográfica; ii) Coleta cartográfica e demográfica; iii) Análise e processamento de dados, com a produção dos mapas temáticos correspondentes; e iv) Análise multicritério (álgebra de mapas) para elaborar o

desenvolvimento de mapeamento de risco, e especialmente, mapeamento de suscetibilidade sísmica. A etapa final foi subdividida em: a) Determinação dos graus ou níveis de perigo das classes de cada fator condicionante; b) Atribuição do peso dos fatores condicionantes; c) Aplicação da álgebra de mapas; e d) Cálculo do risco sísmico e definição de classes de risco. A Figura 01 resume o fluxo metodológico seguido para realizar a cartografia do risco sísmico à liquefação do solo no Haiti.

Figura 1 - Os passos metodológicos da cartografia de risco sísmico à liquefação do solo no Haiti



Fonte: Autores (2026)

Área de Estudo

A área de estudo está localizada na porção oeste da Ilha de Hispaniola (Figura 02), o Haiti faz fronteira terrestre com a República Dominicana a leste, é limitado ao sul pelo Mar do Caribe (ou das Antilhas), ao norte pelo Oceano Atlântico e a Oeste pela terminação leste da Fossa de Bartlett. Abrange cerca de 230 km de norte a sul e 290 km de leste a oeste (BUTTERLIN, 1960). O seu litoral se estende por 1.771 km (BRGM; CIAT, 2015), com uma plataforma continental de 5.000 km² ao longo do Oceano Atlântico e do Mar do Caribe (MATHIEU et al., 2002; SAIMBERTIL, 2016).

Este país possui um clima tropical caracterizado por uma estação úmida alternada, de maio a novembro, e uma estação seca, de dezembro a maio. Nas planícies, as temperaturas médias variam de 28°C no inverno a 32°C no verão, enquanto nas montanhas variam de 18°C a 22°C (BRGM; CIAT, 2015). Em relação às precipitações, a média anual em áreas montanhosas é de 1.200 milímetros e pode chegar a 2.700 milímetros. A precipitação média anual nas planícies é de cerca de 1.200 milímetros e pode chegar a 550 milímetros (USSC, 1999; DOLCIN, 2022).

Figura 2 - Localização e variações topográficas do Haiti

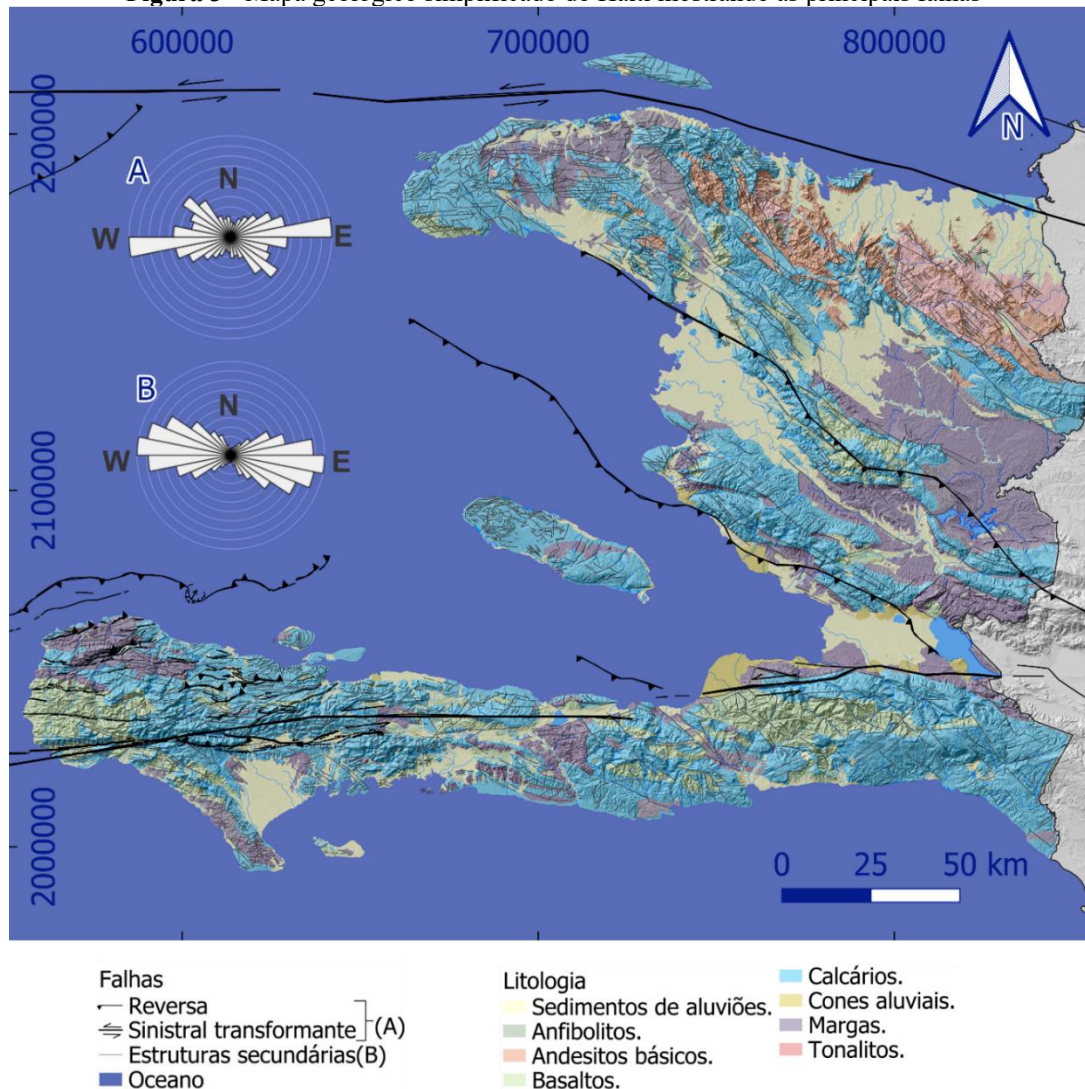


Fonte: Autores (2026)

A constituição litológica do Haiti serve de arcabouço para a classificação dos relevos em relevos calcários ou cársticos e vulcânicos (Figura 03) (BRGM e BME, 1988). O relevo do Haiti apresenta uma paisagem montanhosa, com altitudes alcançando em torno de 2.000 metros em distâncias muito curtas, cercadas por planícies costeiras que se estendem principalmente a oeste (cf. Figura 02). Essas planícies, em sua maioria, estão situadas em altitudes inferiores a 200 metros (BRGM e BME, 1988).

Do ponto de vista tectônico, duas grandes falhas ativas absorvem o movimento de deslizamento na direção geral Leste-Oeste: a Zona de Falha Setentrional (em inglês, SOFZ) ao norte de Hispaniola localizada no mar e a Zona de Falha de Enriquillo-Plantain-Garden (EPGFZ, em inglês) ao sul do Haiti localizada em terra, além de um sistema compressivo, ou seja, um encurtamento comumente chamado de Cadeia ou Cinturão Trans-Haitiano (em inglês, THB), é composto pelas várias falhas reversas de direção NE-SW, localizado em terra e no mar, por exemplo, Zona de Falha Matheux Neiba (SAINT-FLEUR, 2014), como pode ser visto na Figura 03. Este último sistema está ligado à falha principal do EPGFZ (PROYECTO SISMO-HAITI, 2012). Topograficamente, é preciso destacar que o sistema de falhas no Haiti é bastante pronunciado. A geologia do Haiti também é caracterizada pela presença de estruturas secundárias resultantes de ação tectônica.

Figura 3 - Mapa geológico simplificado do Haiti mostrando as principais falhas



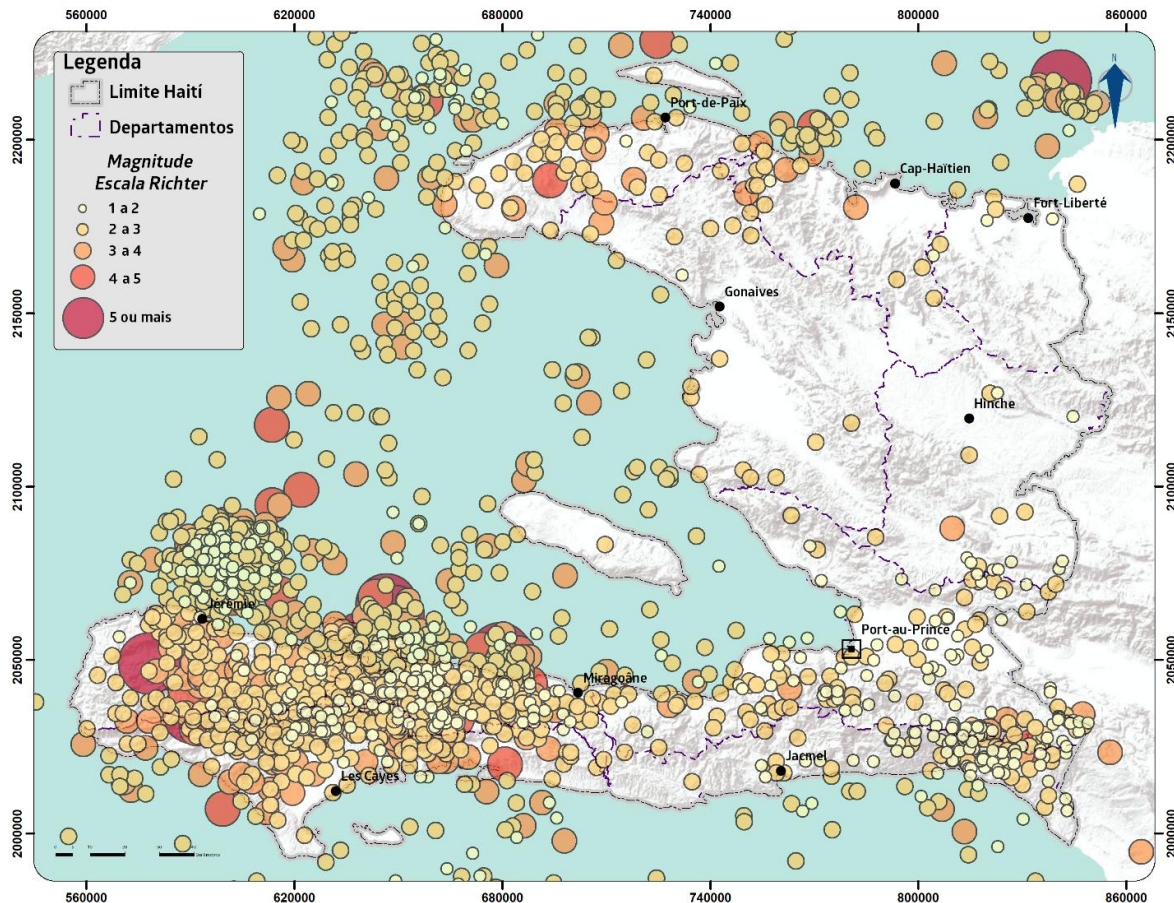
Fonte: Autores (2026)

No que diz respeito à sismologia, as principais fontes de terremotos no Haiti são relativamente bem conhecidas e foram mapeadas desde o século XVI (MORA-CASTRO et al., 2012). No contexto sismotectônico do Haiti, uma rede de sismógrafos foi criada desde o início de 2015 pelo BME do Haiti. A partir desta instrumentação, foram descobertas novas informações sobre ameaças sísmicas. Assim, são publicados os boletins sísmicos anuais, permitindo identificar as zonas sísmicamente ativas. A Figura 04 espacializa em mapa o catálogo de sismicidade, que catálogo foi compilado a partir da fonte de dados BME de 2020 a 2022. A distribuição de terremotos para os anos de 2020, 2021 e 2022 é difusa, principalmente na parte norte do Haiti.

Em escala regional, o mapa de distribuição dos epicentros do Haiti mostra uma sismicidade relativamente média e alta do país com relação à situação geodinâmica desse território. A Península do Sul registrou um número relativamente alto de pequenos tremores durante esses anos (2020, 2021 e 2022), com um grande número de terremotos localizados no mar. Assim, observa-se que a maioria dos terremotos no Haiti foi sentido nas proximidades dos dois principais sistemas mencionados anteriormente (cf. Figura 03): a falha Setentrional e a

falha de Enriquillo. Esse catálogo sísmico instrumental apresenta também uma sismicidade muito baixa na região central do Haiti (cadeia Trans-Haitiano), confirmando que também há falhas ativas nessa região, com potencial sísmico.

Figura 4 - Magnitude de atividades sísmicas no Haiti (2020-2022)



Fonte: Autores (2026)

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica permitiu definir a geomorfologia como o estudo das várias formas e dos processos que resultam as configurações morfológicas da paisagem da Terra (MORAIS e ALMEIDA, 2010) e o risco sísmico como uma combinação da ameaça sísmica, da suscetibilidade sísmica e da exposição populacioanl de acordo com a equação 1 (PANIZZA, 1989; 1991):

$$\text{Equação 1. Risco} = \text{ameaça} * \text{suscetibilidade} * \text{vulnerabilidade}$$

Nesse modelo, a multiplicação implica que, se um dos fatores for nulo, o risco é inexistente. No entanto, para este estudo, foi adaptada uma abordagem conceitual diferente, baseada em Espinal (2019) e adaptada para incluir o componente de suscetibilidade. Optou-se por um modelo aditivo, uma vez que se considera que o risco zero é teoricamente inexistente. Assim, a fórmula utilizada foi:

Equação 2. Risco sísmico (RS) = ameaça sísmica (AS) + suscetibilidade sísmica (SS)
 + vulnerabilidade social (VS)

No entanto, nesse estudo de risco sísmico à liquefação do solo no Haiti, damos prioridade à densidade populacional. Reflete a populacional total por unidade de área. Quanto maior for a densidade populacional, maior será o impacto das atividades humanas nos efeitos provocados pelos terremotos (HUANG et al., 2020). Daí a equação:

Equação 3. Risco sísmico (RS) = ameaça sísmica (AS) + suscetibilidade sísmica (SS)
 + Exposição Populacional (EP)

Este modelo aditivo permite que cada componente contribua de forma independente para o índice de risco final, evitando que um valor baixo em um fator anule a contribuição dos outros. Parte-se do princípio de que os efeitos de um terremoto dependem de múltiplos fatores, onde as configurações geológicas e topográficas são de grande importância (por exemplo, efeitos do local, fenômenos induzidos). As ondas sísmicas podem ser amplificadas tanto em relevo acentuado como em depósitos aluviais não consolidados (LEONE, RICHMOND e VINET, 2010). Para a avaliação, foi utilizada uma análise quantitativa de riscos, baseada em valores numéricos de probabilidade, vulnerabilidade e consequência, a fim de obter um valor final de risco (CORTELETTI, 2014).

Coleta de dados

No âmbito deste trabalho, para a elaboração da cartografia de risco sísmico à liquefação do solo no Haiti (ameaça sísmica, suscetibilidade sísmica e exposição (concentração demográfica)), foram coletados recursos cartográficos, incluindo mapas, arquivos vetoriais e matriciais, para obter os dados primários e secundários do estudo. O Quadro 01 detalha os principais recursos digitais utilizados nessa pesquisa.

Quadro 1 - Base de dados para elaboração deste estudo no Haiti.

Tema	Base de Dados	Fonte	Escala/ resolução
Base cartográfica	- Geologia - Estruturas/tectônica - Geomorfologia - Hidrogeologia - PGA - Vs30 - Catálogo sísmico	BME (Escritório de Minas e Energia) (2015)	1:250.000
			1:1.000.000
	- Limites administrativos	CNIGS (Centro Nacional de Informação	30 metros

	- Modelo Digital de Elevação (DEM) a partir de dados Aster-Gdem V3	Geoespacial) (2014)	
Base demográfica	População (2015)	IHSI (Instituto Haitiano de Estatística e Informática) (2015)	1:1.000.000

Fonte: Autores (2026).

Processamento de dados e Aplicação de métodos de análise multicritério

A avaliação da suscetibilidade sísmica

Por definição, a suscetibilidade é definida com a propensão de uma área ser afetada por um determinado perigo, avaliando os fatores que predispõem à ocorrência dos processos ou ações que o caracterizam, embora o período de retorno do perigo analisado não seja calculado (JULIAO et al., 2009). Para Corteletti (2014), a suscetibilidade é como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes existentes no terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a suscetibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal.

No que diz respeito à suscetibilidade sísmica, é definida como a propensão de uma área ser afetada por um perigo sísmico, considerando os fatores geológicos, morfológicos e hidrológicos locais, tanto da superfície quanto do substrato que podem amplificar as vibrações sísmicas ou gerar condições de instabilidade (PANIZZA, 1989). Para Panizza (1989) e Castaldini et al. (2002), esta apresenta a ameaça induzida pelos aspectos físico-geográficos como configuração geológica e topográfica local da área considerada.

A suscetibilidade sísmica do Haiti é analisada por meio dos fatores geomorfológicos a partir de dados bibliográficos de Mora-Castro et al. (2010), Mora-Castro et al. (2012), Rathje et al. (2011), Berthoumieux et al., 2019, Frankel et al. (2010), Panizza (1989; 1991), Olson et al., 2011, Green et al., 2011 e Xu (2014).

Para esta análise, foram selecionados alguns fatores predisponentes intrínsecos mais importantes que podem condicionar a suscetibilidade sísmica, com base na literatura (Mora-Castro et al., 2010; Rathje et al., 2011; entre outros), sendo eles: declividade, unidade geomorfológica, unidade litológica, unidade hidrogeológica, Vs30 (cf. Quadro 03).

Entre os fatores, a litologia merece uma atenção especial. Portanto, o quadro 2 mostra as regras adotadas para agrupar as vinte e cinco unidades litológicas principais identificadas no mapa geológico em várias famílias “homogêneas” em termos da natureza do substrato (BME, 2005).

Quadro 2 - Categorias de unidades litológicas em termos da natureza do substrato no Haiti (BME, 2005)

Inconsolidadas	Semi-consolidadas	Consolidadas	Muito consolidadas
Qa - depósitos aluviais	P – sedimentos finos	Qc - calcários recifais	Bpa - basaltos nefelínicos
Qac - cones de detritos fluviais	Ms – margas e areias	O - calcários maciços	Bm - basaltos alcalinos
	Mm - calcários margosos	Es - calcários pelágicos	Ev - basaltos e andesitos
	Mi - argilas areníticas	Ems - calcários maciços	Be - basaltos e dacitos
	Mc – argilas e areias	Ep – calcário de plataforma maciça	Gd - tonalitos, quartzodioritos e granodioritos
	Pi - calcários argilosos	Cf - calcário de plataforma	A - andesitos, dacitos, riolitos e riolacitos
		Cs - calcários pelágicos	Ca - conglomerado de calcário com matriz vulcanoclástica
		Cc - calcarenitos	Cb - Complexo toleítico e sedimentar
			U - anfíbolitos e rochas ultrabásicas

Fonte: Autores (2026)

De fato, o processo de mapeamento da suscetibilidade sísmica foi o seguinte: 1) Homogeneização dos dados: todos as camadas de dados foram padronizadas para o mesmo formato, extensão e tamanho de pixel (30x30 metros), utilizando a camada limite do Haiti como referência; 2) Classificação dos fatores: cada fator foi reclassificado em escala de 1 a 5 (muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto), de acordo com sua contribuição para a suscetibilidade (ver Quadro 03); e 3) Análise multicritério: aplicou-se uma análise multicritério simples por meio de álgebra de mapas. Na ausência de um inventário geotécnico histórico exaustivo de eventos de liquefação no Haiti que permitisse uma calibração estatística empírica dos fatores, optou-se por um modelo heurístico de ponderação igualitária (20% para cada um dos cinco fatores geomorfológicos). Esta escolha metodológica apoia-se no Princípio da Razão Insuficiente de Laplace, amplamente utilizado em análises multicritério espaciais exploratórias. Esse princípio preconiza a distribuição equitativa de pesos na ausência de evidências quantitativas de prioridade, evitando assim a introdução de vieses analíticos e julgamentos subjetivos em modelos de macrozoneamento territorial.

Quadro 3 - Indicadores de suscetibilidade sísmica do Haiti.

Fator	Categorias ou Classes	Classe Hierárquica Ou Níveis Perigosos (Grau)	Atributo Numérico	Fonte
Declividade (°)	1 - 8° 8 - 15° 15 - 22° 22 - 35° 35 - +°	Muito baixo Baixo Médio Alto Muito alto	1 2 3 4 5	Xu, 2014
Unidade Geomorfológica	Depósitos costeiros Coberturas detríticas Lagos Maciços residuais Montanhas baixas Planaltos	Muito Alto Muito Alto Muito Alto Muito Baixo Médio Médio	5 5 5 1 3 3	Gilles et al. (2010)
VS30 (m/s)	-180 180 - 360 360 - 760 760 - 1500 1500 a +	Muito alto Alto Médio Baixo Muito baixo	5 4 3 2 1	Frankel et al. (2010);
Unidade Hidrogeológica	Aquíferos Aluviais Aquíferos de Carbonatos Aquíferos Cársticos Aquíferos Cristalinos Aquíferos Sedimentares Indiferenciados	Muito Alto Médio Médio Baixo Médio	5 3 3 2 3	USSC, 1999; Panizza (1989;1991)
Unidade litológica	Inconsolidadas Semiconsolidadas Consolidadas Muito consolidadas	Muito alto Médio Baixo Muito Baixo	5 3 2 1	Berthoumieux et al., 2019

Fonte: Autores (2026).

O cálculo de suscetibilidade sísmica foi calculado usando uma álgebra de mapas desenvolvida a partir dos pesos atribuídos ao grau de cada variável (declividade, Vs30, unidade geomorfológica, unidade litológica, unidade hidrogeológica) pela seguinte equação 4:

$$\text{Equação 4. } SS = \sum_{i=1}^n S_i * W_i$$

Onde: ss = índice de suscetibilidade sísmica, n = número de fatores de geomorfológico, S_i = somatório dos escores fatores geomorfológicos e W_i = peso atribuído aos fatores geomorfológicos.

A avaliação da ameaça sísmica em termos de PGA

Em relação à ameaça sísmica, indica a probabilidade de terremotos que afetam uma área em um determinado período de tempo (BERTIL et al., 2013). Consequentemente, a ameaça sísmica pode ser definida pela seguinte equação 5:

Equação 5. Ameaça sísmica = ameaça sísmica regional (PGA) + ameaça sísmica local (efeitos).

De fato, a ameaça sísmica regional (PGA) corresponde ao nível de exposição à deformação elástica gerada por ondas sísmicas ou vibrações (efeitos diretos), para um solo rochoso homogêneo, enquanto a ameaça local corresponde aos efeitos (diretos pelas rupturas na superfície de uma falha sísmica ativa, efeitos dos sítios e indiretos) que são adicionados à ameaça regional (BERTIL et al., 2013).

Dados inerentes à formação de sismos são geralmente a melhor informação para localizar as fontes de atividade sísmica e determinar o nível de ameaça sísmica (Berthoumieux et al., 2019). Nesse sentido, foi estudada a distribuição dos epicentros para os anos de 2020 a 2022 na base de dados do Escritório de Minas e Energia (BME, em francês) – UTS (Unidade Técnica de Sismologia) para obter o mapa de sismicidade (cf. Figura 04). Os balanços sísmicos foram baseados em eventos registrados pelas redes sismológicas do BME são os seguintes (Tabela 01):

Tabela 1 - Dados das atividades sísmicas do Haiti de 2020 a 2022

Ano	2020	2021	2022
Sismo	499	1647	1451
Magnitude	1,0 - 4,9	1,0 - 7,2	1,0 - 5,5
Descrição	Muito pequenos a leves	Muito pequenos a grandes	Muito pequenos a moderados

Fonte: Autores (2026)

Para a avaliação quantitativa da ameaça sísmica em termos de PGA do Haiti, foram utilizadas as bases de dados do Frankel et al. (2010). Uma equipe do USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) utilizou todas as informações disponíveis, incluindo dados tectônicos e geodésicos, para calcular uma série de mapas probabilístico de ameaça sísmica (Berthoumieux et al., 2019) usando o método de «probabilistic seismic hazard assesment» (PSHA) (Mora-Castro et al., 2010). Os mapas produzidos correspondem à aceleração máxima do solo (PGA), à aceleração espectral de 1,0 s (S1 para longo período), à aceleração espectral de 0,2 s (SS para curto período), com probabilidade de excedência (PE) de 10% e 2% em 50 anos, respectivamente (período de retorno 475 e 2.475 anos respectivamente). Isso quer dizer, o período de 50 anos corresponde à vida média de um edifício. A probabilidade de 10% em 50 anos equivale a uma probabilidade anual de 1 em 500, e a probabilidade de 2% em 50 anos é equivalente a uma probabilidade anual de 1 em 2500.

Neste estudo, foi selecionado o mapa com probabilidade de excedência (PE) de 2% em 50 anos (equivalente a um período de retorno de 2.475 anos). Os valores achados de PGA, expressos (%), foram reclassificados em níveis de risco: baixo (<25%), médio (25-48%) e alto (>48%), conforme detalhado no quadro 04.

Quadro 2 - Indicador de ameaça sísmica do Haiti

Ameaça de referência	Categorias	Níveis Perigosos	Atributo Numérico	Fonte
PGA (em %g)	-25	Baixo	2	BRGM e CIAT, 2015
	25 - 48	Médio	3	
	48 a +	Alto	4	

Fonte: Autores (2026)

A avaliação da exposição populacional (concentração demográfica)

A exposição representa as pessoas, os bens e, de maneira geral, os elementos expostos com valor (social, econômico, funcional...) que podem ser afetados por um fenômeno natural potencialmente perigoso (LEONE, RICHMOND e VINET, 2010).

Para abordar analiticamente a exposição do Haiti no plano social, foi utilizado o banco de dados do Instituto Haitiano de Estatística e Informática - IHSI (2015) (Tabela 02). Os dados de densidade populacional por departamento (Tabela 02) foram utilizados para gerar um mapa de concentração demográfica. As densidades foram reclassificadas em cinco níveis, de muito baixo a muito alto, atribuindo um valor numérico de 1 a 5 a cada classe (Tabela 03).

Tabela 2 - Unidade geográfica, população total, área e densidade estimadas em 2015

Unidade geográfica	População total	Área em km ²	Densidade
Departamento de Oeste	4.029.705	4 982,56	809
Departamento de Sudeste	632.601	2 034,10	311
Departamento de Norte	1.067.177	2 114,91	505
Departamento de Nordeste	393.967	1 622,93	243
Departamento de Artibonite	1.727.524	4 886,94	353
Departamento de Centro	746.236	3 487,41	214
Departamento de Sul	774.976	2 653,60	292
Departamento de Grande Anse	468.301	1 911,97	245
Departamento de Noroeste	728.807	2 102,88	347
Departamento de Nippes	342.525	1 267,77	270

Fonte: Autores (2026)

Tabela 3 - Indicador de vulnerabilidade social do Haiti

Tipo de Exposição	Variável	Classes	Níveis Perigosos	Atributo Numérico	Fonte
População	Densidade (População/Km ²)	0 – 245	Muito baixo	1	IHSI, 2015
		245 – 311	Baixo	2	
		311 – 353	Médio	3	
		353 – 505	Alto	4	
		505 – 809	Muito alto	5	

Fonte: Autores (2026)

A avaliação do nível de risco sísmico à liquefação do solo

O risco sísmico é uma combinação de fatores, uma vez calculada o risco para cada componente, procedeu-se à criação de um indicador de risco final à liquefação do solo que combinasse as três componentes (ameaça sísmica, suscetibilidade sísmica e concentração

demográfica), através de uma análise multicritério (MURÃO, 2021). Segundo De Pietri, Dietrich e Mayo (2011) a análise multicritério é definida como todas as operações de tomada de decisão que consideram vários critérios ou restrições simultaneamente.

A integração multicritério adotou um modelo aditivo com estrutura de pesos equivalentes (33,33% para cada componente: ameaça sísmica, suscetibilidade sísmica e vulnerabilidade social) para obter o mapa final de risco sísmico à liquefação do solo. Do ponto de vista teórico-conceitual da redução de riscos de desastres (WISNER et al., 2003), a manifestação do perigo físico, a suscetibilidade intrínseca do terreno e a exposição humana constituem pilares ontologicamente equivalentes para a materialização de uma catástrofe. Portanto, a atribuição de pesos iguais reflete a premissa de que tanto as dinâmicas físicas quanto as socioespaciais possuem igual centralidade e interdependência na configuração do risco final, justificando a soma ponderada equitativa das matrizes normalizadas (valores de 1 a 5) em ambiente SIG.

O cálculo do risco sísmico à liquefação do solo foi realizado em um ambiente SIG por meio da seguinte operação (cf. Equação 3) de álgebra de mapas:

$$RS = [(AS * 0,333) + (SS * 0,333) + (EP * 0,333)].$$

Os valores numéricos resultantes foram classificados em cinco níveis de risco: o muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da suscetibilidade das características intrínsecas fatores geomorfológicos à liquefação do solo no Haiti

Os principais dados geológicos disponíveis neste estudo estão no mapa geológico do Haiti e em sua nota descritiva (BME, 2005) produzindo um zoneamento sísmico inicial. Os depósitos do Cretáceo até o Quaternário são interpretados como unidades muito consolidadas, consolidadas, semi-consolidadas e inconsolidadas (Figura 05A e Quadro 05). Esta classificação conta com as litologias descritas na figura 05 (BME, 2005) seguindo a definição das categorias de solo do código IBC (International Building Code) (cf. Quadro 08). Portanto, este zonamento permite identificar as zonas mais sensíveis aos riscos induzidos por terremotos (Figura 05A).

Quadro 3 - Unidade litológica simplificada do Haiti segundo da natureza do substrato

Período	Tipo de rochas	Categorias de rocha	Materiais de cobertura	Categorias dos solos
Quaternário	Predominantemente os cascalhos, areias, argilas	Inconsolidadas	Solos aluviais	E e D (Solo muito "macio") e (Solo "macio")
Paleógeno	Predominantemente as margas	Semi-consolidadas	Solos margosos	C (Substrato rochoso)

+	Predominantemente os calcários	Consolidadas	Solos calcários	"macio" ou solo firme)
Neógeno				
Cretáceo	Predominantemente os basaltos	Muito consolidadas	Solos basálticos	B (Substrato rochoso)

Fonte: Autores (2026)

A análise das características geológicas evidencia que os tipos de solos do Haiti provêm, principalmente, de dois tipos de materiais: rochas vulcânicas e rochas sedimentares. Porém, os solos calcários, derivados de rochas sedimentares, predominam em todo o país, cobrindo mais de 80% do território, sendo o restante constituído por rochas de origem vulcânica (WOODRING, BROWN e BURBANK, 1924). Na Figura 05A, observa-se que a maioria das depressões é composta por solos aluviais macios (Quadro 05). Na verdade, a ocupação de áreas com estes solos devem ser evitados sem um estudo geotécnico. Essas depressões geralmente constituem situações geomorfológicas que podem amplificar ondas sísmicas. Elas são muito suscetíveis à liquefação de solos soltos.

Geomorfologicamente, o relevo da área de estudo é muito diversificado, com anticlinais e sinclinais delimitados por falhas e alternando de norte a sul (BME, 2005). Então, as variações topográficas (cf. Figura 01) permitem subdividir a área de estudo em distintas unidades geomorfológicas resultantes (Figura 05B e Quadro 06) das ações de eventos tectônicos e clima (BME, 2005):

Quadro 4 - Descrição das unidades geomorfológicas do Haiti

Domínios Morfoestruturais	Unidades Geomorfológicas	Descrição: Aspectos Geomorfológicos
Depósitos Sedimentares Quaternários	Depósitos costeiros	São o resultado de acumulações flúvio-marinhas compostas de sedimentos quaternários não consolidados.
Coberturas Sedimentares Quaternários	Coberturas detríticas	Correspondem aos depósitos aluviais do quaternário inconsolidados. Essas feições ocorrem particularmente nas depressões.
Domínio cenozóico	Montanhas baixadas e colinas intermediárias	Encontram-se em toda a área de estudo, entre as serras e as planícies.
Bacias e Coberturas Sedimentares cenozóico	Planaltos	Correspondem às feições de relevos planos ou dissecados emoldurados por maciços rochosos residuais.
Domínio do Cretáceo	Maciços residuais	São cadeias de montanhas e maciços

Fonte: Autores (2026)

Este segundo zoneamento pode observar que as duas primeiras unidades desempenham um papel importante nos fenômenos induzidos por terremotos, especialmente nas depressões

(planícies e vales) preenchidas por aluviões não consolidados. Contudo, nas três últimas unidades, a presença de topografia acentuada pode amplificar o movimento do solo. No Haiti, nas bordas das cadeias montanhosas, os depósitos aluviais (depósitos torrenciais) foram interpretados como paleo-deslizamentos de terra (BME, 2005). No entanto, segundo Panizza (1989), os terremotos às vezes provocam deslizamentos de terra antigos. Ainda para Panizza (1989), estes tipos de solo aumentam amplificação local da vibração sísmica. A área é fortemente influenciada pela litologia na morfologia, como mostra a Figura 05B.

Devido à sua topografia, o Haiti não possui grandes sistemas fluviais (GEO-HAÏTI, 2010; Dolcin, 2022). As variações nas estruturas geológicas, geomorfológicas, tipos de rochas e precipitação contribuem para as variadas condições das águas subterrâneas em diferentes partes do país (Figura 05C e Quadro 07). Entre os aquíferos, as águas subterrâneas na área de estudo estão concentradas principalmente em aquíferos aluviais. Aqueles mais produtivos são muito rasos, variando de 1 a 8 metros de profundidade (USSC, 1999). No Haiti, nas planícies e nos vales dos rios, o nível freático geralmente pode atingir menos de 150 metros de profundidade; nas montanhas, pode ter mais de 200 metros de profundidade (USSC, 1999). Então, o quadro 07 apresenta a descrição das unidades hidrogeológicas do Haiti (USSC, 1999). Neste terceiro zoneamento, os aquíferos aluviais são sistematicamente rasos. Para Panizza (1989), estes tipos de aquífero aumentam a amplificação das ondas sísmicas.

Quadro 5 - Descrição das unidades hidrogeológicas do Haiti

Unidades hidrogeológicas	Depósitos	Profundidade de Aquíferos (m)	Descrição: Aspectos Hidrogeológicos
Aquíferos aluviais	Incoerentes	a menos de 50 m	Permeáveis a semipermeáveis
Aquíferos carbonáticos (fraturados)	Coerentes	de 5 a 50 m	Semipermeáveis
Aquíferos cársticos (extremamente fraturados)	Coerentes	de 5 a 25 m	Semipermeáveis
Aquíferos sedimentares indiferenciados	Semi-coerentes	de 5 a 50 m	Semipermeáveis
Aquíferos cristalinos	Muito coerentes	a mais de 100 m	Impermeáveis

Fonte: Autores (2026)

A declividade é um fator geomorfológico importante na ocorrência de deslizamentos de terra (XU, 2014). Com relação ao índice de declividade (Figura 05D), o relevo do Haiti consiste principalmente em montanhas íngremes que ocupam a maior parte de sua extensão (cf. Figura 01). Apenas uma parte menor do território está localizada em zona plana. O Haiti tem um relevo bem definido. A Figura 05D evidencia no território da área de estudo a variação da declividade, onde 50% dos picos têm inclinações superiores a 22° (40%) e, as planícies e os planaltos com declives de 1 a 4° representam apenas 25% da área total do país, onde há alta ocupação urbana. Com relação ao risco sísmico, uma declividade superior a 30° é um valor crítico para movimentos de massa frequentes (PRIETO, 2018; PANIZZA, 1989). Neste quarto zoneamento, pode observar que o Haiti possui áreas de risco muito alto da amplificação topográfica. Pois, os efeitos topográficos do local concentram-se em cristas, bancos de rocha ou encostas íngremes (GILLES et al., 2020).

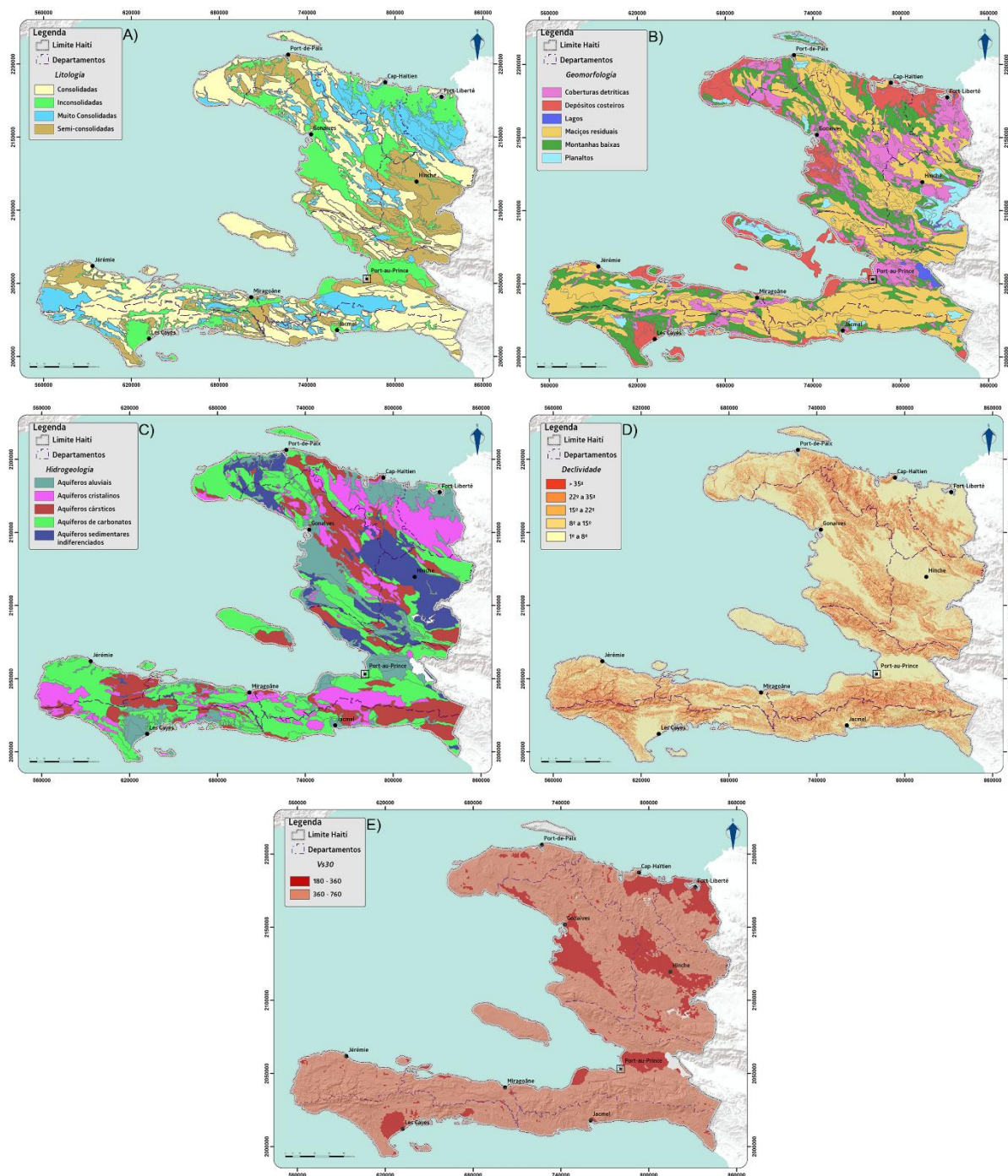
A Figura 05E apresenta o parâmetro Vs30 (velocidade média de propagação das ondas de cisalhamento nos primeiros 30 metros) da área variando de 180 a mais 760 m/s. Essa variação corresponde aos solos muito macios até o substrato rochoso. De acordo com Frankel et al. (2010), neste último zoneamento, quatro categorias de solos foram estabelecidas para o Haiti (Quadro 08):

Quadro 6 - Categorias de solo do código segundo IBC (International Building Code) em termos de Vs30 (Gilles et al, 2020)

Categorias dos solos (IBC)	Natureza do substrato	Parâmetros de Vs30 (m/s)
B	Substrato rochoso	760-1500
C	Substrato rochoso "macio" ou solo firme	360-760
D	Solo "macio"	180-360
E	Solo muito "macio"	<180

Fonte: Autores (2026)

Na Figura 05E, observa-se que solos aluviais, com velocidades médias de ondas de cisalhamento de cerca de 360 m/s nos primeiros 30 metros podem amplificar o movimento do solo em comparação com o substrato rochoso (Quadro 08). Essa figura mostra também valores baixos para as depressões. Mas esses valores aumentam em altura, que também são susceptíveis de gerar efeitos induzidos pelos terremotos, principalmente em regiões com elevada declividade (deslizamentos de terra). A figura abaixo (05E) relaciona os valores do parâmetro vs30 com a espessura dos depósitos no Haiti. De fato, as condições geomorfológicas locais (particularmente o solo macio assente em rochas mais duras) podem criar efeitos que amplificam a intensidade de um terremoto. Portanto, segundo Berthoumieux et al. (2019), esse fenômeno se deve aos contrastes de velocidade das ondas S entre o solo e o substrato subjacente. É reconhecido que os danos a edifícios construídos em terrenos aluviais são geralmente mais graves do que os danos a edifícios construídos em substratos rochosos. Os efeitos dos sítios (amplificações/atenuação de ondas sísmicas) de grande escala são levados em consideração pela velocidade de propagação das ondas de cisalhamento nos primeiros 30 metros (Mora-Castro et al., 2010).



Fonte: Autores (2026).

Análise da suscetibilidade sísmica à liquefação do solo em virtude dos fatores geomorfológicos

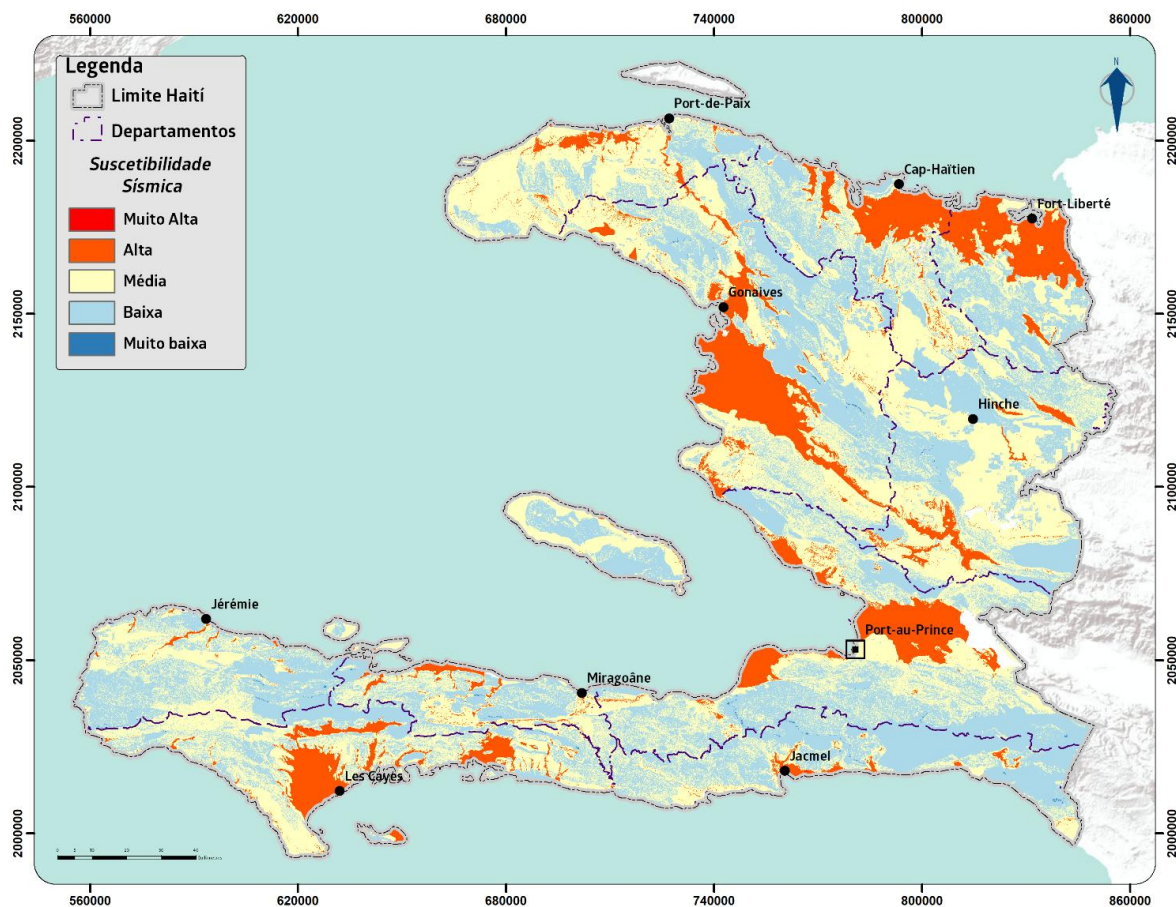
A Figura abaixo mostra o produto final da sobreposição de fatores geomorfológicos que constituem a suscetibilidade sísmica do Haiti. Nesse estudo, a suscetibilidade sísmica foi classificada em cinco níveis hierárquicos (Figura 06), variando de muito baixa a muito alta. Nesta figura, as regiões mais vulneráveis são as planícies onde fatores geomorfológicos são

altos. Infelizmente, as cidades com elevada densidade populacional são geralmente encontradas nessas depressões na forma de residências informais e distribuídas de forma anárquica.

A classe de muito baixa e baixa suscetibilidade sísmica encontram-se em zonas montanhosas com declives muito acentuados. Por outro lado, as classes de suscetibilidade média encontram-se em zonas com declives moderados.

O mapeamento da suscetibilidade sísmica no Haiti permitiu identificar as áreas mais suscetíveis de serem afetadas por sismos, definindo diferentes classes de suscetibilidade. Cerca de 25% da área está exposta à suscetibilidade sísmica, uma vez que esta é a área das planícies aluviais não consolidadas.

Figura 6 - Mapa do Haiti mostrando a suscetibilidade sísmica à liquefação do solo



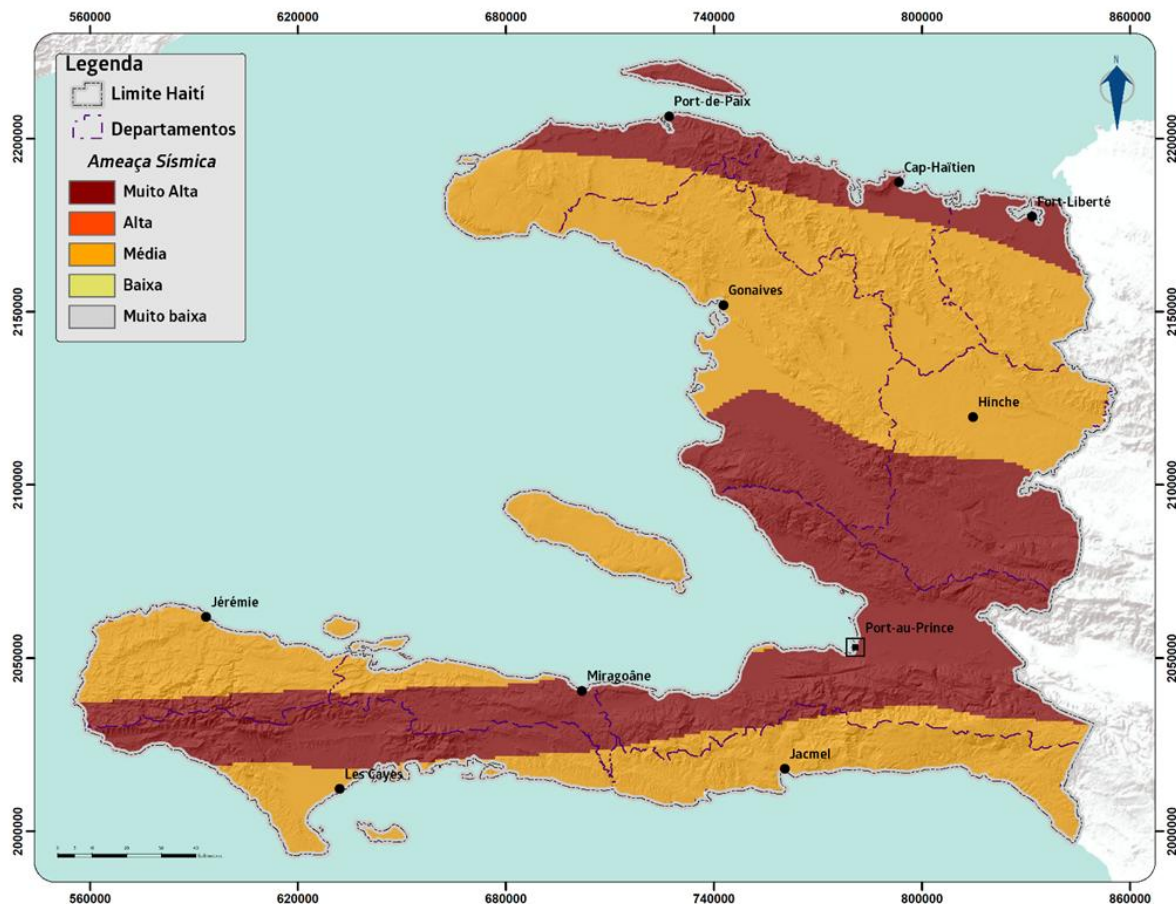
Fonte: Autores (2026)

Análise da ameaça sísmica (PGA) do Haiti

A Figura abaixo mostra o PGA que indica o nível da ameaça sísmica. A ameaça é representada sob a forma de pico de aceleração do solo (PGA) para um período de retorno de 2.475 anos, ou seja, uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos. A aceleração é expressa como uma percentagem da aceleração devida à gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). No mapa de ameaça sísmica 1:1.000.000, são indicados 3 níveis de ameaça indicados: 1) alto ($\text{PGA} > 48\% g$); 2) médio (PGA entre 25 e 48% g); 3) baixo ($\text{PGA} < 25\% g$). Portanto, as áreas com alto valor ($\text{PGA} > 48\% g$) são muito sensíveis à ameaça sísmica.

Nesta representação, a aceleração máxima do solo (PGA) estimada no estudo de Frankel et al. (2010) mostra valores fortes ao longo de falhas ativas: Enriquillo, a sul, Setentrional, a norte (FRANKEI et al., 2010). Este mesmo estudo também indica igualmente um nível de perigosidade elevado para as falhas da cadeia de Matheux a norte da planície de Cul-de-Sac que separa a parte norte e sul do Haiti. Esses valores de PGA diminuem com a distância dessas falhas, que provavelmente geram grandes terremotos. Geralmente, os códigos sísmicos utilizam a ação sísmica com uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos, o que corresponde a um período de retorno de 2.475 anos.

Figura 7 - Mapa de ameaça sísmica da região do Haiti com PGA (%) com 2% probabilidade de excedência em 50 anos no Haiti



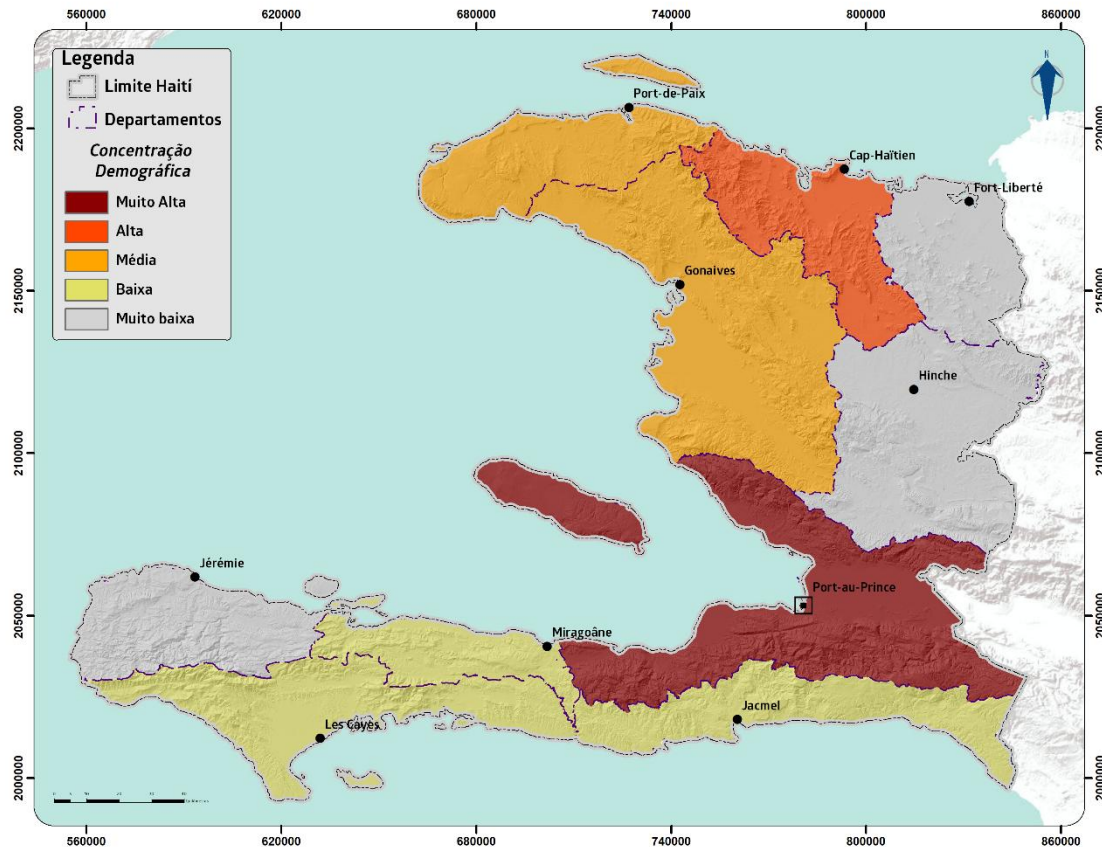
Fonte: Autores (2026)

Análise da exposição humana do Haiti

A população é o elemento mais importante a respeito da vulnerabilidade social (DOLCIN, 2022). Nesse contexto, de acordo com os dados mais recentes do IHSI (2015), o Haiti abrange uma área de 27.750 km². É um país pequeno e densamente povoado com uma população de cerca de 10,9 milhões de pessoas e uma densidade média de 403 habitantes por km² e com um crescimento populacional de 1,44%. Ainda de acordo com IHSI (2015), 52% da população do Haiti está concentrada em áreas urbanas, numa situação que se agrava ao longo dos anos. A densidade da população nas várias cidades ameaçadas pela sismicidade no Haiti é um dos principais fatores de vulnerabilidade.

Na Figura 08, mostra-se que a área de estudo está dividida em dez ambientes sociais, com a maioria da população concentrada nos setores Oeste e Norte.

Figura 8 - Exposição populacional do Haiti



Fonte: Autores (2026)

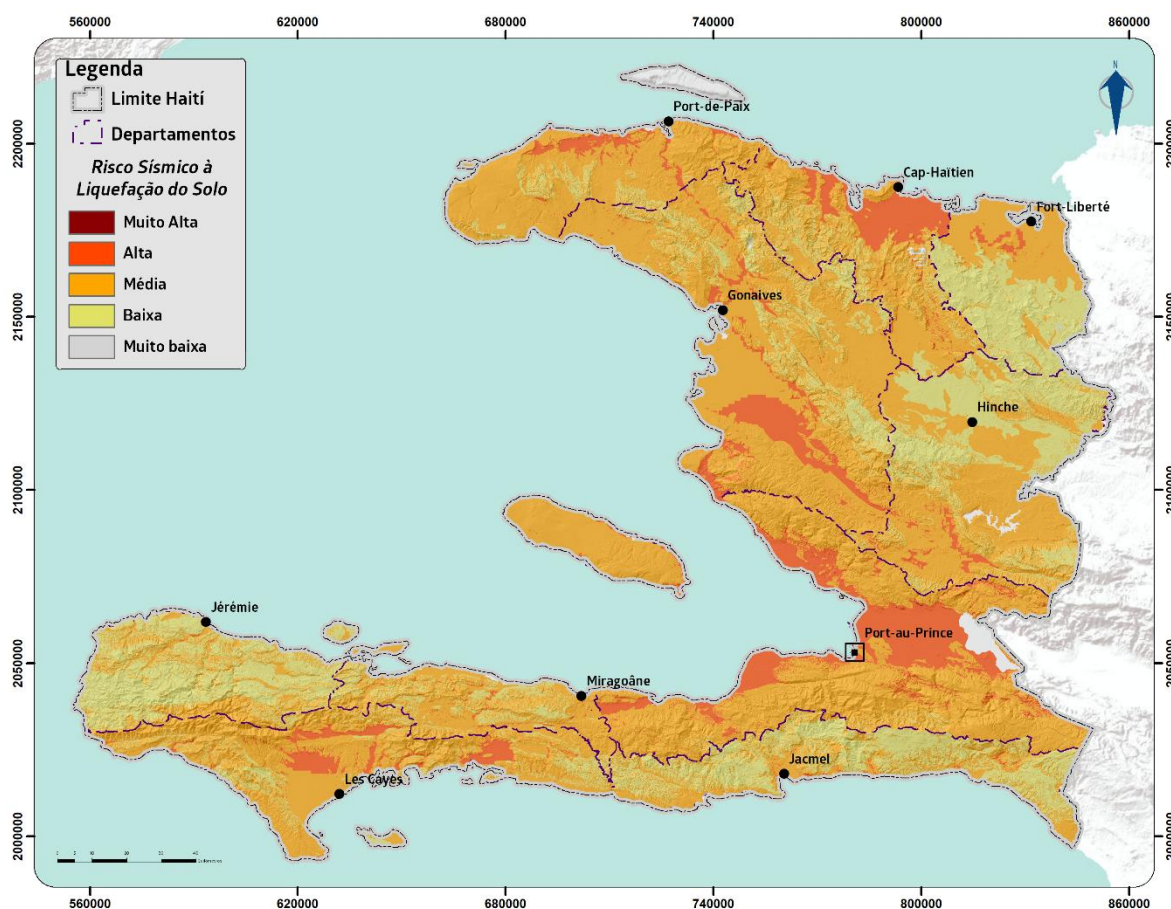
Análise do nível de risco sísmico à liquefação do solo no Haiti

A Figura 09 mostra o risco sísmico no Haiti. As regiões mais vulneráveis incluem o departamento Norte, o Oeste e a área metropolitana de Porto Príncipe onde fatores geomorfológicos, como encostas íngremes e solos instáveis, combinam-se com uma elevada densidade populacional.

Em termos de configuração, a interação entre a atividade tectônica ao longo das falhas Enriquillo-Plantain Garden e Septentrional-Oriente e o uso inadequado da terra em áreas urbanas densas foi identificada como exacerbadamente significativamente a magnitude das ameaças. Esta situação é agravada pelo desmatamento extensivo, que reduz a estabilidade do solo, e pela construção de moradias sem padrões de engenharia resistentes a desastres.

A análise geoespacial e os dados históricos de eventos mostram que estas áreas registaram eventos recorrentes, como o terremoto de 2010 e deslizamentos de terra frequentes na estação chuvosa, indicando claramente que existe uma ameaça latente. A sobreposição de mapas de perigos com a densidade populacional mostra que quase 52% da população está em áreas de alto risco sísmico, o que destaca a necessidade de estratégias de mitigação urgentes.

Figura 10 - Risco sísmico à liquefação do solo do Haiti



Fonte: Autores (2026)

No Haiti, além da influência primária dos principais sistemas de falhas, a influência da unidade de relevo nos efeitos locais dos terremotos é de grande importância. Do ponto de vista geomorfológico, a presença de cadeias de montanhas altas e depósitos aluviais não consolidados em depressões pode favorecer fenômenos induzidos por terremotos. Eles influenciam a materialização das ameaças ligadas à geodinâmica externa (deslizamentos de terra, fluxos torrenciais, etc.) e à liquefação do solo (MORA-CASTRO et al., 2010).

A configuração geomorfológica do Haiti é oriunda de sua história geológica (DOLCIN, 2022). Devido à sua estrutura geomorfológica, o Haiti está sujeito a efeitos da amplificação do movimento sísmico ligados à litologia ou topografia, tanto por aqueles induzidos como por liquefação dos solos e movimentos de massa. Sobre este ponto, certos autores invocaram os efeitos de sítio topográficos e geológicos em áreas ao sul da aglomeração de Porto Príncipe durante o terremoto de 12 de janeiro de 2010 (HOUGH et al., 2010; ASSIMAKI e JEONG, 2013; ULYSSE et al., 2018; GILLES et al., 2020). De fato, durante esse terremoto, os danos mais significativos foram observados em casas localizadas em solo solto (sedimentos recentes não consolidados) e em áreas com relevo particularmente acentuado. De acordo com Mora-Castro et al. (2012), mais de 7.000 deslizamentos de terra foram ativados e se formaram em encostas com declives entre 25°- 65°. Também o efeito da liquefação observado no porto de Porto Príncipe (Haiti) após o terremoto de 12/01/2010 afetou preferencialmente as áreas recentemente aterradas (OLSON et al., 2011; BRGM; CIAT, 2015).

A convergência espacial dos fatores mapeados neste estudo fornece uma explicação mecânica e reológica rigorosa para a ocorrência da liquefação do solo no território haitiano. Do ponto de vista físico, a liquefação ocorre quando solos granulares não consolidados sofrem uma perda súbita de resistência ao cisalhamento devido ao aumento abrupto da pressão da água nos poros (pore water pressure) induzida pelas tensões cíclicas das ondas sísmicas (NURHACI, 2024; MAVROULIS e LEKKAS; 2026). No contexto do mapeamento realizado, a superposição cartográfica demonstra que as planícies costeiras e depressões intramontanhosas reúnem as três condições intrínsecas para o desencadeamento desse fenômeno: (i) matriz litológica de depósitos aluviais holocênicos inconsolidados (Quadro 05); (ii) saturação crítica decorrente de aquíferos aluviais extremamente rasos, com nível freático posicionado entre 1 e 8 metros de profundidade (Quadro 07); e (iii) força desencadeadora externa representada por um PGA superior a 48%g (Figura 07).

Esta assinatura mecânica explica os severos danos históricos observados no porto de Porto Príncipe durante o evento tectônico de 12 de janeiro de 2010. Conforme analisado por Olson et al. (2011), a violenta aceleração cíclica atuando sobre os terrenos aterrados e sedimentos marinhos saturados da linha de costa causou a liquefação generalizada do substrato, gerando fenômenos de espalhamento lateral (lateral spreading), ejeções de areia (sand boils) e recalques diferenciais catastróficos que colapsaram os cais e as instalações portuárias. Portanto, os polígonos de alta susceptibilidade delimitados nesta pesquisa mapeiam as zonas onde a física do solo e a dinâmica geomorfológica predispõem estruturalmente o território ao colapso mecânico sob carregamento sísmico.

Esta tragédia deixou mais de 230.000 mortos e 300.000 feridos (BILHAM, 2010; SAINT-FLEUR, 2014). A situação resultou em um trauma psicossocial profundo. As perdas econômicas totalizaram mais de 8 milhões de dólares, cerca de 120% das perdas do Haiti em 2009 (MORA-CASTRO et al., 2012; GREEN e MILES, 2011). Esses números mostram a extrema dificuldade em que se encontra a população haitiana e também explicam muito da vulnerabilidade do país aos riscos sísmicos.

Na verdade, nenhum terremoto de magnitude equivalente causou tantos danos. Em comparação, o terremoto ocorrido no Chile em 2010 causou apenas 500 mortes (PERRAULT, 2014). Alguns pesquisadores não conseguem acreditar que um terremoto relativamente pequeno matou tantas pessoas no Haiti (BILHAM, 2010; LACASSIN, 2010). O terremoto do Chile foi 500 vezes mais forte do que o do Haiti. Mas, além da sua vulnerabilidade sísmica e tectônica acrescenta-se a geomorfologia do país, que também é um fator que influencia o nível de destruição. Os efeitos induzidos por esse terremoto mostram claramente o potencial dos fatores geomorfológicos sobre os efeitos locais dos terremotos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo trouxe uma análise sobre a avaliação dos riscos sísmicos no Haiti em uma abordagem geomorfológica à liquefação do solo. Com este objetivo, o texto aqui apresentado, mostra o problema dos riscos sísmicos é uma questão crucial no Haiti, pois estão reunidas todas as condições para a ocorrência de catástrofes no caso de um grande terremoto, devido aos fatores geomorfológicos e à situação social geral. Nessa situação, as planícies são as áreas mais vulneráveis às susceptibilidades sísmicas, onde vive a maioria da população.

Os contributos geomorfológicos deste estudo permitiram, assim, uma avaliação em grande escala do risco sísmico à liquefação do solo, tendo em conta as influências de fatores geomorfológicos nos efeitos dos terremotos. Devido à configuração geológica e topográfica, estas contribuições incluem além das evidências de liquefação do solo:

1. fatores causais dos riscos induzidos por terremotos.

2. evidências de efeitos de sítio.
3. evidências de movimentos de massa.

A síntese dos dados geológicos, tectônicos, geomorfológicos e morfométricos levou a uma melhor compreensão do risco sísmico à liquefação do solo do Haiti. Portanto, a importância de incluir a geomorfologia como um agente importante nesse tipo de estudo é muito relevante. Tendo em conta os danos causados, em parte, pelos efeitos induzidos pelos recentes sismos mortais no Haiti, é essencial uma melhor avaliação a priori destes efeitos locais em grande escala para melhorar a prevenção dos riscos sísmicos. Nesse sentido, as formas do relevo desempenham um papel determinante nos modos de apropriação do espaço. Além da energia do terremoto, a propagação dessa energia dentro e na superfície da terra, é fundamental considerar a configuração geológica, topográfica, hidrológica e hidrogeológica, pois também os impactos de um terremoto variam em função destes fatores. Em outras palavras, são esses fatores que condicionam a suscetibilidade a efeitos induzidos pelos terremotos.

A interpretação desses dados permite prever que, em relação ao relevo e ao contexto sismotectônico do Haiti, mais especificamente, a região do sul do Haiti, um grande terremoto poderia afetar novamente com extremos efeitos colaterais. Essa região possui vários departamentos considerados de alto potencial sísmico e vulneráveis às perdas de vidas.

Por fim, em um contexto geral, o estudo destaca a importância do ordenamento do território para preparar e promover medidas de atenuação, principalmente no que diz respeito às condições de construção resistentes a terremotos e à preparação para lidar com os impactos de áreas de maior suscetibilidade sísmica.

REFERÊNCIAS

ADAGUNODO, T. A.; Sunmonu, L. A. Earthquake: A terrifying of all natural phenomena. **Journal of Advances in Biological and Basic Research**, v. 1, n. 1, 4-11, 2015.

ASSIMAKI, D.; JEONG, S. « Ground-Motion Observations at Hotel Montana during the M 7.0 2010 Haiti Earthquake: Topography or Soil Amplification? ». **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 103, n. 5, p. 2577–2590, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120120242>.

AZZURRA, L. **Évaluation technique des menaces naturelles des communes de Jacmel, Petit Goâve, Grand Goâve (Haïti)**, 2012.

BERTHOUMIEUX, J. J.; SAIMBERTIL, M.; GÉNÉA, S.; JEAN-PHILIPPE, J.; GILLES, R.; JEAN-BAPTISTE, M. **Méthodologie pour l'étude de l'aléa sismique**. 2019, 144p.

BERTIL D.; PRÉPETIT, C.; BELVAUX, M.; NOURY, G. **Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti): rapport de synthèse**. 2013, 69 p. Rapport BRGM/RC-63100-FR.

BILHAM, R. Lessons from the Haiti earthquake. **NATURE**, v. 463, n. 7283, p. 878-879, 2010.

BME. Bureau des Mines et de l'Energie. **Notice explicative de la carte géologique d'Haïti au 1/250 000ème**. 2005, 44 p.

BME/UTS - Bureau des Mines et de l'Energie. **Bulletin sismique annuel**. 2020, 6 p.

BME/UTS - Bureau des Mines et de l'Energie. **Bulletin sismique annuel**. 2021, 8 p.

BME/UTS - Bureau des Mines et de l'Energie. **Bulletin sismique annuel**. 2022, 4 p.

BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières); CIAT (Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire). **Atlas des Menaces Naturelles en Haïti**. 2015, 114p.

BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières/France); BME (Bureau des Mines et de l'Énergie/Haiti). **La synthèse géologique de la république d'Haïti**. 1988, 1182 p.

BUTTERLIN, J. **Géologie générale et régionale de la République d'Haïti**. Thèse (Doctorat en Géologie) – Institut des Hautes Études de l'Amérique Latine, Université de Paris, Paris. 1960. 234 p.

CASTALDINI, D.; BARBIERI, M.; BETTELLI, G.; CAPITANI, M.; PANIZZA, M. A methodology for medium-scale seismic susceptibility maps: an example from the modena apennines (northern italy). **Italian Journal of Quaternary Sciences**, 15(2), 225-245, 2002.

CORTELETTI, R. C. **Proposta de metodologia para análise de riscos geológico -geotécnicos em ferrovias. Estudo de caso: Estrada de Ferro Carajás (EFC)**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014. 202p.

DE PIETRI, D.; DIETRICH, P.; MAYO, P. Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en Argentina. **Rev Panam Salud Publica**, v. 30, n. 4, p. 377-387, 2011.

DOLCIN, D. **Gestão de riscos sísmicos no Haiti: abordagem geotécnica**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa. 2022. 143p.

ESPINAL, J. F. S. **A construção estratégica e participativa do direito à cidade – desenvolvimento urbano e gestão do risco em Medellín e o Vale de Aburrá**. 2019. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2019, 323 p.

FRANKEL, A.; HARMSSEN, S.; MUELLER, C.; CALAIS, E.; HAASE, J. **Documentation for Initial Seismic Hazard Maps for Haiti**. 2010, 12p. Open-File Report 2010-1067.

FRITZ, H. M.; HILLAIRES, J. V.; MOLIÈRE, E.; WEI, Y.; MOHAMMED, F.; Twin Tsunamis Triggered by the 12 January 2010 Haiti Earthquake. **Pure and Applied Geophysics**, v. 170, p. 1463–1474, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0479-3>.

GEO-HAÏTI. **État et Perspectives de l'Environnement**. 2010, 200 p.

GILLES, R.; JEAN-PHILIPPE, J.; DORIVAL, V.; GÉNÉA, S. **Microzonage sismique du secteur V: rapport des effets de site et liquefaction**. 2020. 195p.

GORUM, T.; WESTEN, C. J. V.; KORUP, O.; MEIJDE, M. V. D.; FAN, X.; MEER, F. D. V. D. Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haiti earthquake. **Geomorphology**, v. 184, p. 127–138, 2013.

GREEN, R.; MILES, S. Social Impacts of the Jan. 12th Haiti Earthquake. **Earthquake Spectra**, v.27, n. S1, p. S447-S462, 2011.

GREEN, R. A.; OLSON, S. M.; COX, B. R.; RIX, G. J.; RATHJE, E.; BACHHUBER, J.; FRENCH, J.; LASLEY, S.; MARTIN, N. Geotechnical Aspects of Failures at Port-au-Prince Seaport during the 12 January 2010 Haiti Earthquake. **Earthquake Spectra**, v. 27, n. S1, p. S43–S65, 2011. <https://doi.org/10.1193/1.3636440>.

HOUGH, S. E.; ALTIDOR, J. R.; ANGLADE, D.; GIVEN, D.; JANVIER, M. G.; MAHARREY, J. Z.; ZEREMONTE, M.; MILDOR, B. S.-L.; PREPETIT, C.; YONG, A. Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 M 7.0 Haiti earthquake. **NATURE GEOSCIENCE**, v. 3, p. 778-782, 2010. <https://doi.org/10.1038/NGEO988>.

HUANGA, F.; CAO, Z.; GUO, J.; JIANG, S.-H.; LIB, S.; GUO, Z. Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping. **Catena**, v. 191, n. 104580, p. 1-14, 2020.

IHSI. Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique. **Estimation de la population totale, population de 18 ans et plus ménages et densités en 2015**. 2015. 131 p.

JAIMES, D. L.; ESCUDERO, C. R.; FLORES, K. L.; ZAMORA-CAMACHO, A. 2022. Multicriteria seismic risk assessment in Puerto Vallarta metropolitan area, Mexico. **Research square**, p. 1-33. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1718023/v1>.

JOSEPH, C.; SYMITHE, S.; CAZEAU, H.; DORNEVIL, W. **Country document for disaster risk reduction: Haiti**. 2016. 116p.

JULIÃO, R. P.; NERY, F.; RIBEIRO, J. L.; CASTELO, B. M.; ZÊZERE, J. L. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica de base municipal**. 2009, 94 p.

LACASSIN, R. Les tremblements de terre d'Haïti (Mw 7 - janvier 2010) et du Chili (Mw 8, 8 - février-mars 2010). **Géochronique**, n. 115, p. 25-27, 2010.

LEONE, F.; RICHEMOND, N. M. DE; VINET, F. **Aléas naturels et gestion des risques**. 1ère édition. Paris: Presse universitaire de France, 2010. 284 p.

MALAKAR, S.; RAI, A. K. Estimating seismic vulnerability in West Bengal by AHP-WSM and AHP-VIKOR. **Natural Hazards Research**, v. 2, p. 464–473, 2023.

MATHIEU, P.; CONSTANT, J. A.; NOËL, J.; PIARD, B. **Cartes et étude de risques, de la vulnérabilité et des capacités de réponse en Haïti**. 2002. 213p.

MAVROULIS, S.; LEKKAS, E. GIS-Based Liquefaction Susceptibility Assessment by Using Geological, Geomorphological, Hydrological and Satellite-Derived Data: AHP for the Ionian Islands (Western Greece). **Geosciences**, v. 16, n. 148, p. 1-44, 2026. <https://doi.org/10.3390/geosciences16040148>

MCHUGH, C. M.; SEEGER, L.; GULICK, S. P.S.; MAGNANI, M. B.; HORNBAUGH, M.; STECKLER, M. S.; WRIGHT, V.; LEROY, S.; CABIATIVA-PICO, V.; DASENT, J.; KERSH, J.; KILBURN, R.; JAMES-WILLIAMSON, S. Sedimentary signatures of large earthquakes along the submerged Enriquillo–Plantain Garden transpressional plate boundary, northern Caribbean. **Geology**, v. 52, n. 10, p. 1-6, 2024.

MEDDE. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. **Prévention des risques naturels: Les séismes**. 2012, 58 p.

MEISINA, C. BONÌ, R. BOZZONI, F. CONCA, D. PEROTTI, D. PERSICILLO, P. LAI, C. G. Mapping soil liquefaction susceptibility across Europe using the analytic hierarchy process. **Bulletin of Earthquake Engineering**, v. 20, p. 5601–5632, 2022.

MORA-CASTRO, S.; ASTÉ, J.-P.; COTERA, J.; HAASE, J.; JOSEPH, V.; MARCELLO, M.; MILCÉ, J.-E.; ROUMAGNAC, A.; SABORÍO, J.; ZAHIBO, N.; BILLAND, C.; SOLÍS, H.; SIERAKOWSKI, C. **Analyse des menaces naturelles multiples en Haïti étape 2: reconstruction des quartiers**. 2010, p. 78.

MORA-CASTRO, S.; SABORÍO, J.; ASTÉ, J.P. PREPETIT, C.; JOSEPH, V.; MATERA, M. Slope instability hazard in Haiti: Emergency assessment for a safe reconstruction. **Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through**, p. 153-172, 2012.

MORAIS, F.; ALMEIDA, L. M. de. Geomorfologia Fluvial da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaú, Palmas, estado do Tocantins. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Uberlândia, v. 1, n. 2, p. 331-351, 2010.

MOURÃO, D. da S. **Análise espacial multicritério na avaliação do risco sísmico: caso de estudo da região do Algarve, Portugal**. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2021. 125 p.

NURHACI, D. S. Analysis of liquefaction potential using the analytical hierarchy process method in bantul district, yogyakarta province, Indonesia. **KURVATEK**, v. 9, n. 2, p. 197 – 206, 2024. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v9i2.5409>

OLSON, S. M.; GREEN, R. A.; LASLEY, S.; MARTIN, N.; COX, B. R.; RATHJE, E.; BACHHUBER, J.; FRENCH, J. Documenting Liquefaction and Lateral Spreading Triggered by the 12 January 2010 Haiti Earthquake. **Earthquake Spectra**, v. 27, n. S1, p.S93–S116, 2011.

OLUWAFEMI, J. O.; OFUYATAN, O. M.; SADIQ, O.M.; OYEBISI, S. O.; ABOLARIN, J.S.; BABAREMU, K.O. **Review of world earthquakes**. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, n. 9, p. 440–464, 2018.

PANIZZA, M. Geomorphological contributions to seismic risk assessment. **Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Qual.** n 2, p. 111-114, 1989.

PANIZZA, M. Geomorphology and seismic risk. **Earth-Science Reviews**, 31, p. 11-20, 1991.

PEREIRA, D. M. **Desastres naturais na amazônia: avaliação de riscos na bacia hidrográfica do rio purus**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Pará, Pará. 2014. 125 p.

PERRAULT, M. **Évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiment à partir de mesures in situ**. 2014. Thèse (Doctorat en Sciences de la Terre et de l'Environnement) - Université de Grenoble, Grenoble. 2014, 223 p.

261

PRIETO, C. C. **Previsão de deslizamentos em encostas por meio de modelagem numérica: estudo de caso na bacia piracuama, município de campos do jordão, sp**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. 2018, 211 p.

PROYECTO SISMO-HAITI. **Evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Haití y aplicación al diseño sismorresistente**. 2012. 108 p.

RATHJE, E. M.; Bachhuber, J.; Dulberg, R.; Cox, B. R.; Kottke, A.; Wood, C.; Green, R. A.; Olson, S.; Wells, D.; Rix, G. Damage Patterns in Port-au-Prince during the 2010 Haiti Earthquake, **Earthquake Spectra**, v. 27, n. S1, p. S117–S136, 2011.

SAIMBERTIL, M. **Les sources sismiques potentielles dans le golfe de la (Gonâve, Haiti): analyse de données bathymétriques et sismiques**. Rapport de stage de Recherche Master 2 (Maîtrise en Géologie) - Université nice Sophia Antipolis, Antipolis. 2016. 42p.

SAINT-FLEUR, N. **Sismotectonique du système de failles d'Enriquillo et du séisme du 12 janvier 2010 (Mw 7.0) en Haïti**. 2014. Thèse (Doctorat en Géophysique) - Ecole doctorale des Sciences de la Terre, L'Institut de Physique du Globe de Paris, Paris. 2014, 277 p.

ULYSSE, S.; BOISSON, D.; PRÉPETIT, C.; HAVENITH, H-B. Site Effect Assessment of the Gros-Morne Hill Area in Port-au-Prince, Haiti, Part A: Geophysical-Seismological Survey Results. **Geosciences**, v. 8, n. 142, p. 1-22, 2018. DOI: 10.3390/geosciences8040142.

UNITED STATES SOUTHERN COMMAND (USSC). **L'évaluation des ressources d'eau d'Haïti**. 1999. 89 p.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, L. At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. Second edition, 2003. 134 p.

WOODRING, W.P., BROWN, J.S.; BURBANK, W.S. **Geology of the Republic of Haiti**. Department of Public Works, Port-au-Prince. Baltimore, Maryland: Lord Baltimore Press, 1924. 640 p.

XU, C. A Preliminary Spatial Distribution Analysis of Landslides Triggered by the 2010 Haiti Earthquake. **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**, v. 3, p. 1-9, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0_29.