



Avaliação do perigo associado a movimentos de massa em sítios pré-coloniais do Arquipélago de São Sebastião (SP)

José Eduardo Bonini ¹
Tiago Damas Martins ²
Bianca Carvalho Vieira ³

RESUMO

Movimentos de massa podem afetar a integridade e o valor de uso de patrimônios culturais localizados em áreas suscetíveis à sua ocorrência ou expostas à trajetória de deslocamento destes processos. Diversos estudos foram realizados, sobretudo na Europa, com o objetivo de caracterizar o perigo a que estão expostos patrimônios culturais utilizando métodos quantitativos. No entanto, abordagens baseadas em modelos de base física para esta finalidade ainda são escassas em contextos tropicais úmidos e no Brasil. O objetivo desta pesquisa foi identificar o perigo a movimentos de massa em sítios arqueológicos pré-coloniais do Arquipélago de São Sebastião (SP), previamente identificados como potencialmente ameaçados em uma análise de suscetibilidade em escala regional (1:100.000). Foram aplicados o modelo SHALSTAB para identificar limiares de precipitação diários para deflagração de escorregamentos e o modelo de trajetória de movimentos de massa GPP. Dados de elevação foram derivados do MDE TanDEM-X (12m), dados de propriedades geotécnicas foram obtidos na literatura e um inventário de cicatrizes foi utilizado para otimizar e validar ambos os modelos. Ambos os modelos aplicados foram submetidos a um experimento fatorial completo para otimização dos parâmetros, utilizando o inventário de cicatrizes e a área abaixo da curva ROC (AAC-ROC) como métrica de qualidade. A melhor combinação de parâmetros do modelo SHALSTAB apresentou AAC-ROC igual a 0.71, enquanto para o GPP o melhor modelo possui AAC-ROC igual a 0.80. A reprodução dos modelos nas áreas com sítios potencialmente ameaçados resultou em dois cenários: a) um com iniciação dos escorregamentos em áreas classificadas pelo SHALSTAB como incondicionalmente instáveis; e b) áreas de iniciação associadas a limiares de precipitação diária entre 50 e 100mm. No primeiro cenário, dois dos 12 sítios são atravessados por 55% e 62% das simulações de trajetória, com velocidades de deslocamento do material entre 1.23 e 9.7 m/s. No segundo cenário, 8 sítios são afetados pelos movimentos de massa, todos eles atravessados por 60% ou mais das simulações de trajetória e com velocidades de deslocamento da massa deslizada entre 5.8 e 9.7 m/s. Conclui-se que os sítios identificados em escala regional estão ameaçados por movimentos de massa, com probabilidade de afetarem sítios em ao menos 50% dos casos de precipitações abaixo de 50mm que deflagrem movimentos de massa e superior a 60% para precipitações entre 50 e 100mm. As velocidades estimadas indicam potencial de danos severos ao patrimônio cultural, com potencial soterramento dos sítios ou mobilização do material arqueológico.

Palavras-chave: Escorregamentos rasos, SHALSTAB, *Gravitational Process Path*, Patrimônio cultural, Serra do Mar.

1. INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são processos naturais cruciais na evolução de relevos montanhosos sendo que sua ocorrência em áreas ocupadas pode representar um perigo às populações, infraestruturas e patrimônios culturais expostos (Borgatti; Soldati, 2010). Análises de perigo em escalas regionais envolvem a determinação das trajetórias

¹ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo - USP, jose.bonini@usp.br;

² Professor do Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP, td.martins@unifesp.br;

³ Professora do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo - USP, biancacy@usp.br;



prováveis das rupturas, sua magnitude e frequência (Corominas; Moya, 2008). Movimentos de massa estão entre as principais ameaças naturais aos patrimônios culturais no mundo e o aumento esperado de sua frequência e magnitude como consequência das mudanças climáticas poderá agravar esta situação (UNESCO, 2007; ICOMOS, 2019). Neste contexto, a compreensão do perigo aos patrimônios culturais representado por movimentos de massa se torna uma necessidade e pesquisas anteriores foram orientadas com este objetivo, sobretudo no exterior (Nicu; Asandulesei, 2018; Yang et al., 2023; Bonini et al., 2025a).

No Brasil, trabalhos anteriores avaliaram a exposição de patrimônios culturais a movimentos de massa, mas ainda são escassas abordagens quantitativas com este objetivo (Zanirato; Ribeiro, 2014; Sousa et al., 2018; Bonini et al., 2023a), sobretudo com foco em sítios arqueológicos pré-coloniais. A partir de modelos estatísticos de suscetibilidade em escala regional, Bonini, Vieira e Corrêa (2023b) identificaram sete sítios arqueológicos pré-coloniais localizados em terrenos suscetíveis à ocorrência de escorregamentos rasos no litoral norte do Estado de São Paulo. Tais sítios são sobretudo sambaquis, acampamentos conchíferos e ictiológicos localizados nas ilhas do Arquipélago de São Sebastião (**Figura 1**). No contexto do litoral norte paulista, os sítios conchíferos constituem os registros mais antigos da ocupação humana da costa, com idades até 8.000 anos calibrados AP (Afonso, 2017; Filippini; Eggers, 2006). Estes sítios fornecem informações sobre a ocupação humana de regiões costeiras, evolução cultural e biológica das populações e mudanças climáticas, o que justifica a necessidade de análises aprofundadas sobre potenciais consequências de movimentos de massa sobre a integridade destes sítios. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi identificar o perigo a escorregamentos rasos em sítios arqueológicos pré-coloniais do Arquipélago de São Sebastião (SP) a partir da combinação de modelos quantitativos para análise de suscetibilidade, limiares críticos de precipitação e simulação de trajetórias dos processos.

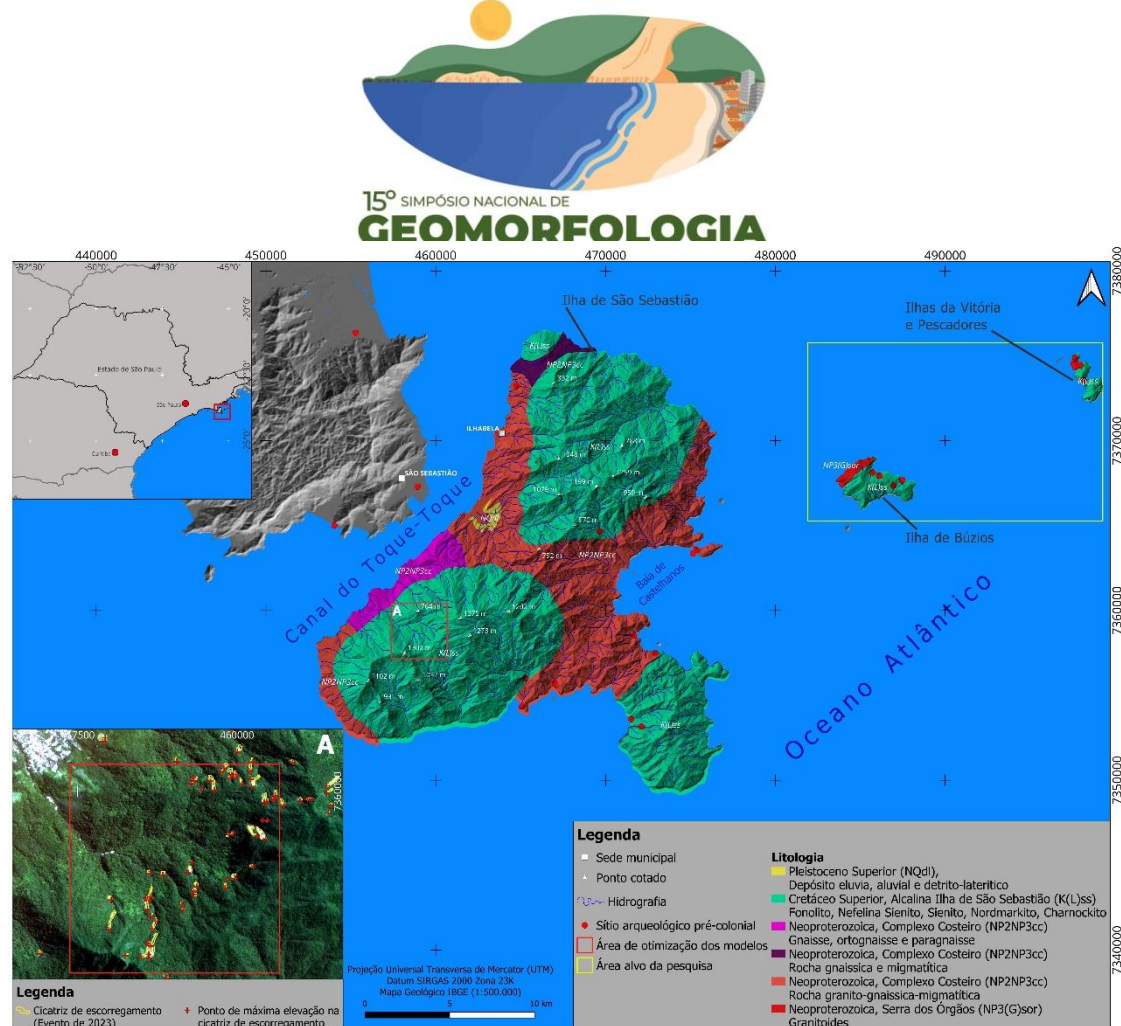


Figura 1: Localização, litologia e sítios arqueológicos pré-coloniais do Arquipélago de São Sebastião. (A) Área utilizada para otimização dos modelos aplicados e inventário de cicatrizes de escorregamentos rasos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados e software

Os dados utilizados foram: dados de elevação; de propriedades geotécnicas de solos; e de localização de ocorrências anteriores de escorregamentos rasos. Dados de elevação foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) TanDEM-X (12m de resolução). Propriedades geotécnicas de solos foram obtidas a partir da literatura em áreas com contexto geomorfológico e geológico similares. Por fim, a localização dos escorregamentos foi obtida no inventário do evento de 2023 (Bonini et al., 2025b).

2.2 Modelos de suscetibilidade e de trajetória de escorregamentos rasos

A suscetibilidade foi avaliada com o modelo de base física SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Model*), que permite determinar a precipitação crítica diária para a deflagração de escorregamentos rasos a partir da combinação de um modelo de estabilidade de equilíbrio limite e um modelo hidrológico estacionário que assume



fluxos subsuperficiais paralelos à superfície e condicionados pela topografia (Dietrich; Montgomery, 1998; Montgomery; Dietrich, 1994).

As trajetórias dos escorregamentos foram estimadas com o modelo *Gravitational Process Path* (GPP), que possui duas componentes (Wichmann, 2017). A primeira componente estima as potenciais trajetórias dos escorregamentos a partir de áreas definidas como zonas de iniciação da simulação, utilizando uma simulação *Random Walks* com três parâmetros que devem ser otimizados (Goetz et al., 2021; Wichmann, 2017). A segunda componente corresponde ao modelo de fricção. De acordo com literatura, o modelo de fricção baseado em dois parâmetros (PCM) (Perla; Cheng; McClung, 1980) pode ser otimizado para a simulação de trajetória de escorregamentos rasos (Klade, 2022). Para ambas as componentes do GPP, os intervalos de valores testados para cada parâmetro foram obtidos na literatura (Klade, 2022).

2.3 Otimização dos modelos e análise do perigo em sítios arqueológicos pré-coloniais

Ambos os modelos foram otimizados a partir de um experimento fatorial completo, ou seja, pela produção de modelos para todas as combinações possíveis de parâmetros dentro de um intervalo de valores definido. O conjunto de parâmetros ótimos de cada modelo foi definido pelo valor de área abaixo da curva *Receiver Operating Characteristics* (AAC-ROC), computada a partir da comparação de cada modelo com um inventário de escorregamentos.

Uma vez que o modelo SHALSTAB determina potenciais zonas de ruptura, os valores de AAC-ROC foram computados considerando apenas a potencial zona de ruptura de cada cicatriz no inventário. A zona de ruptura foi definida segundo Goetz et al. (2021), a partir de um raio de 50m ao redor do ponto de maior elevação dentro da cicatriz, posteriormente extraíndo apenas a área deste raio dentro dos limites do escorregamento mapeado no inventário. Para a otimização do modelo GPP, foram utilizadas as zonas de ruptura derivadas do inventário como zonas de iniciação da simulação, sendo que a AAC-ROC de cada modelo produzido foi computada com o restante da cicatriz (assumindo-o como as prováveis zonas de transporte e deposição).

Para a análise de perigo, foram considerados dois cenários com zonas de iniciação dos escorregamentos definidas a partir de limiares de precipitação derivados com o modelo SHALSTAB. No Cenário 1, estas zonas correspondem às áreas classificadas como incondicionalmente instáveis. Por sua vez, as zonas de iniciação do Cenário 2 foram definidas como as áreas com limiares abaixo de 100mm/dia. Foram



computados em ambos os cenários a frequência de trajetórias simuladas (%) e a velocidade máxima do processo (m/s) ao longo das trajetórias, analisando a relação entre estes produtos e as localizações dos sítios arqueológicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Otimização dos modelos SHALSTAB e GPP

A otimização do modelo SHALSTAB resultou em 405 combinações de parâmetros e mostrou maior influência sobre a acurácia do modelo exercida pela coesão, o ângulo de atrito interno (ϕ) e a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}). Os parâmetros do modelo com melhor acurácia (AAC-ROC = 0.709) e do segundo modelo com melhor acurácia (AAC-ROC = 0.690) se diferenciam apenas pelo valor de K_{sat} (1.25 e 1.75 m/h, respectivamente) (**Tabela 1**). Estes resultados alinham-se com os de estudos anteriores em que valores altos de ϕ combinados com valores de coesão que tendem a zero resultaram em melhores acurácias, enfatizando o controle topográfico sobre os escorregamentos (Guimarães et al., 2003; Martins et al., 2017).

Tabela 1: Intervalos de valores de parâmetros testados para os modelos SHALSTAB e GPP e parâmetros ótimos encontrados

	Parâmetro	Intervalo de valores testados	Incremento entre cada modelo	Parâmetros ótimos
SHALSTAB	Densidade do solo saturado (g/cm^3)	1.40 – 1.60	0.10	1.40
	Condutividade hidráulica saturada (m/h)	1.25 – 2.25	0.25	1.25
	Espessura do solo (m)	1.00 – 3.00	1.00	1.00
	Ângulo de atrito interno ($^\circ$)	36 – 38	1.00	38
	Coesão (MPa)	0.0001 – 0.025	0.0012	0.0001
GPP	Limiar de ângulo ($^\circ$)	20 - 30	2.0	30
	Expoente de divergência (-)	2.0 – 3.0	0.5	3.0
	Fator de persistência (-)	1.5 – 2.0	0.25	1.75
	Coeficiente de fricção (-)	0.1 – 0.6	0.1	0.2
	Razão massa-arrasto (-)	25 - 250	25	25

No caso do modelo GPP, a otimização resultou em 54 e 60 combinações de parâmetros para a primeira e segunda componentes do modelo, respectivamente. O modelo final com ambas as componentes possui boa acurácia (AAC-ROC = 0.801). O limiar de ângulo otimizado (30°) é corroborado por trabalhos anteriores na Serra do Mar (De Ploey; Cruz, 1979; Nery; Vieira, 2015; Vieira et al., 2018), sendo um valor plausível para assumir que, em encostas com tal inclinação, o processo continua a se propagar. Os valores do expoente de divergência e do fator de persistência se alinham



também com trabalhos anteriores que analisaram trajetórias de escorregamentos rasos (Klade, 2022), assumindo valores que constroem a massa deslizada a se propagar de maneira coesa. No caso dos parâmetros do modelo de fricção, os valores de coeficiente de fricção garantem deslocamentos mínimos da massa deslizada quando o ângulo de inclinação se encontra abaixo do limiar de ângulo, enquanto os valores da razão massa-arrasto baixos asseguram que ocorra o aumento de velocidade em terrenos íngremes.

3.2 Análise de perigo nos sítios arqueológicos pré-coloniais

No Cenário 1 (**Figura 2B e 3B**), com iniciação de escorregamentos a partir de células incondicionalmente instáveis pelo SHALSTAB (excluídas as células mapeadas na carta geomorfológica como paredões e costões rochosos), dois dos doze sítios arqueológicos são atingidos por mais de 50% das trajetórias simuladas, com velocidades mínima e máxima de 1.27 m/s e 9.7 m/s, respectivamente (**Figura 2C e 3C**). No Cenário 2, com iniciação em células com limiar de precipitação igual ou menor que 100mm/dia, oito sítios são afetados por ao menos 60% das trajetórias (**Figura 2D e 3D**), com velocidades entre 5.8 m/s e 9.7 m/s (**Figura 2E e 3E**). Nota-se neste segundo caso um incremento na velocidade mínima do processo, possivelmente associado a coalescência de trajetórias em relevos que permitem o desenvolvimento de velocidades mais elevadas. O Cenário 2 também sugere que o incremento de velocidade pode estar associado aos volumes de precipitação, o que requer validação com dados meteorológicos e modelos hidrológicos transientes.

Em relação aos sítios arqueológicos pré-coloniais, pode-se considerar o Concheiro Búzios I e a Toca do Gentio como ameaçados por se localizarem nas trajetórias de propagação de ambos os cenários. O Concheiro Búzios I é um sítio conchífero caracterizado pelo acúmulo de conchas, ossos de peixes e artefatos líticos associados a ocorrência de terra preta (Cali, 2000). Este sítio foi parcialmente afetado por intervenções antrópicas. A Toca do Gentio é um sítio do tipo acampamento localizado em um abrigo sob rocha na Enseada do Abrigo (Ilha da Vitória), com duas bacias de polimento no teto do abrigo e ocorrência de vestígios líticos e cerâmicos em superfície (Bendazzoli, 2014). Este sítio se destaca pela sua posição estratégica na enseada por sua proximidade de fontes de água doce e a facilidade de embarque e desembarque proporcionada pela enseada (Bendazzoli, 2014). Entre os sítios afetados por mais de 70% das trajetórias no Cenário 2, destacam-se também a Toca do Barro Vermelho e o Sambaqui do Costão por suas datações relativamente recuadas para sítios conchíferos



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

em contextos insulares do Estado de São Paulo e os mais antigos do Arquipélago de São Sebastião (1682 anos calibrados AP e 1349 anos calibrados AP, respectivamente) (Bendazzoli, 2014).

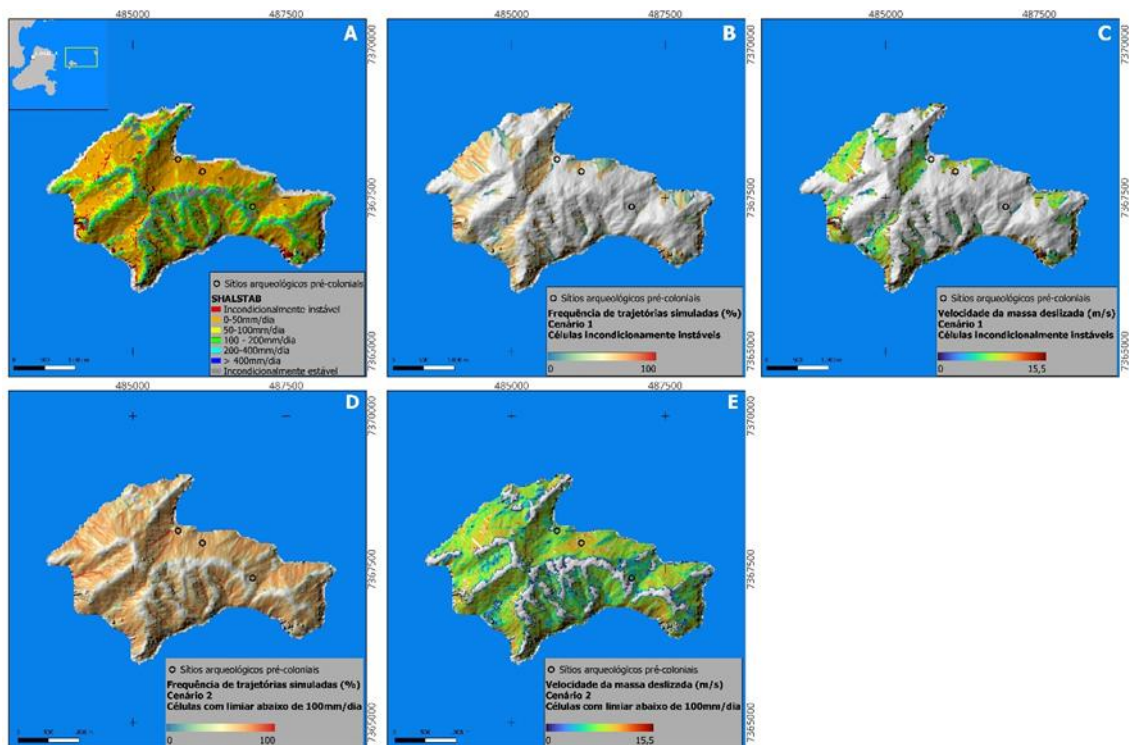


Figura 2: (A) Resultados do modelo SHALSTAB e distribuição de sítios arqueológicos na Ilha de Búzios. (B) Frequência de trajetórias simuladas com o GPP no Cenário 1; (C) Velocidade máxima (m/s) ao longo das trajetórias no Cenário 1; (D) Frequência de trajetórias simuladas no Cenário 2; (E) Velocidade máxima ao longo das trajetórias no Cenário 2.

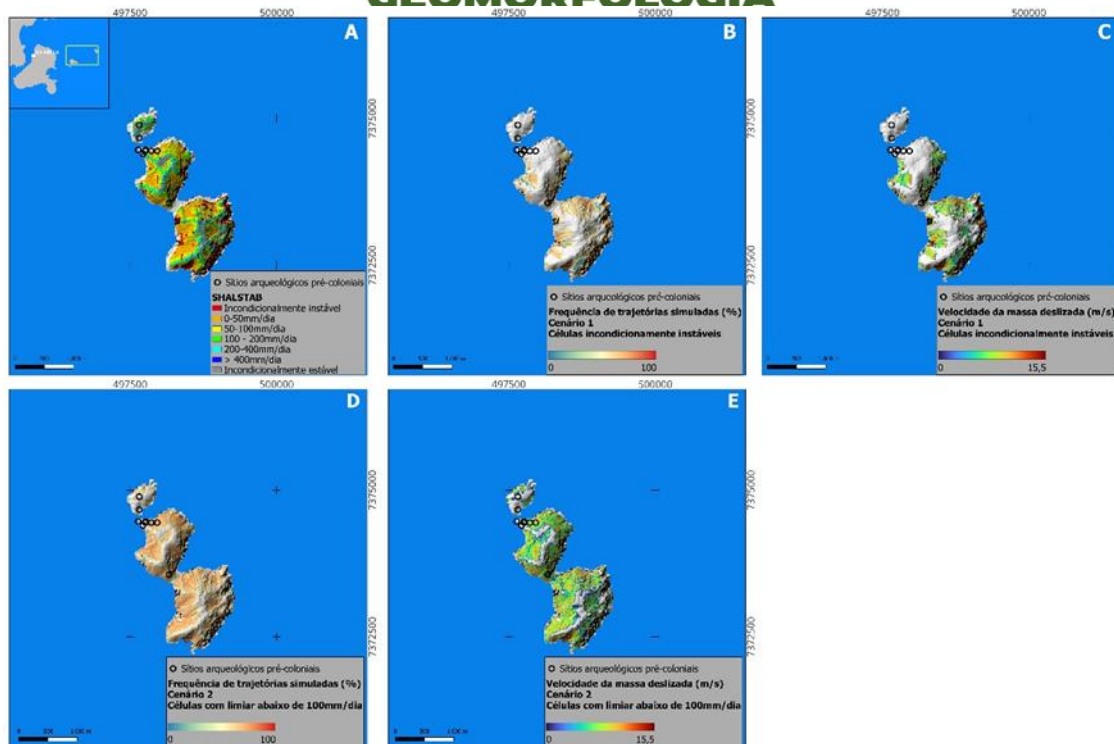


Figura 3: (A) Resultados do modelo SHALSTAB e distribuição de sítios arqueológicos na Ilha da Vitória. (B) Frequência de trajetórias simuladas com o GPP no Cenário 1; (C) Velocidade máxima (m/s) ao longo das trajetórias no Cenário 1; (D) Frequência de trajetórias simuladas no Cenário 2; (E) Velocidade máxima ao longo das trajetórias no Cenário 2.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, foi analisado o perigo a escorregamentos rasos em sítios arqueológicos pré-coloniais do Arquipélago de São Sebastião, a partir de métodos quantitativos. Foi possível identificar que oito sítios arqueológicos podem ser afetados por 60% por ou mais das trajetórias possíveis de escorregamentos deflagrados por precipitações de até 100mm/dia. As velocidades estimadas dos processos podem chegar até 9.7 m/s, podendo causar danos severos aos sítios, devido a mobilização do material arqueológico e a consequente perda de seu contexto ou o soterramento dos sítios. Trabalhos futuros podem estimar a recorrência de eventos de precipitação com diferentes intensidades, permitindo estabelecer a probabilidade temporal dos sítios serem afetados, bem como a realização de levantamentos de campo para avaliar o estado de conservação dos sítios e refinar os modelos preditivos com dados coletados *in situ*.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo #2021/04621-6). Os autores agradecem ao Programa de Pós-



Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo (PPGF-USP) e aos colegas do Grupo de Pesquisas de Processos Morfodinâmicos e Ambientais (GPmorfo-USP).

REFERÊNCIAS

- AFONSO, M. C. Arqueologia dos sambaquis no litoral de São Paulo: análise da distribuição dos sítios e cronologia. **Especiaria - Cadernos de Ciências Humanas**, v. 17, n. 30, p. 203–227, 2017.
- BENDAZZOLI, C. **O Panorama da Ocupação Sambaqueira no Arquipélago de Ilhabela, SP**. Doutorado em Arqueologia, Museu de Arqueologia e Etnologia, São Paulo, Universidade de São Paulo, 2014.
- BONINI, J. E. *et al.* Landslides and Cultural Heritage—A Review. **Heritage**, v. 6, n. 10, p. 6648–6668, 2023a.
- BONINI, J. E. *et al.* Assessing landslide susceptibility and dynamics at cultural heritage sites by integrating machine learning techniques and persistent scatterer interferometry. **Geomorphology**, v. 469, p. 109522, 2025a.
- BONINI, J. E. *et al.* Landslide inventory of the 2023 Serra do Mar disaster (Brazil). **Discover Geoscience**, v. 3, n. 1, p. 40, 2025b.
- BONINI, J. E.; VIEIRA, B. C.; CORRÊA, A. C. de B. Is the Brazilian precolonial archaeological heritage in danger? Regional-scale susceptibility assessment in the Serra da Capivara (Piauí State) and the Serra do Mar (São Paulo State). In: TOFANI, V.; CASAGLI, N. (orgs.). 6th World Landslide Forum, 14 a 17 de Novembro de 2023. **Landslide science for sustainable development**. Florença, Itália: OIC S.r.l., 2023b.
- BORGATTI, L.; SOLDATI, M. Landslides and Climatic Change. In: ALCÁNTARA-AYALA, I.; GOUDIE, A. (orgs.). **Geomorphological Hazards and Disaster Prevention**. Cambridge, MA, USA: Cambridge University Press: 2010. p. 87–95.
- CALI, Plácido. **Plano de Manejo PEIb. Submodulo 4B – Patrimonio Cultural Material**. Acervo Superintendência IPHAN São Paulo.: [S.n.].
- COROMINAS, J.; MOYA, J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 193–213, 2008.
- DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. **Catena**, v. 6, p. 111–122, 1979.
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. **NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement)**, p. 29, 1998.
- FILIPPINI, J.; EGGERS, S. Distância biológica entre sambaquieiros fluviais (Moraes – Vale do Ribeira-SP) e construtores de sítios litorâneos (Piaçaguera e Tenório-SP e Jabuticabeira IISC). **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, n. 15–16, p. 165, 2006.
- GOETZ, J. *et al.* Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 21, n. 8, p. 2543–2562, 25 ago. 2021.



GUIMARÃES, R. F. *et al.* Parametrization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, p. 99-108, 2003.

ICOMOS, Climate Change and Cultural Heritage Working Group. **The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action**. Paris: ICOMOS, 2019.

KLADE, M. **Reichweitenmodellierung von flachgründigen Hangrutschungen mit dem Gravitational Process Path Model in ausgewählten Gemeinden des Steirischen Beckens**. Dissertação de Mestrado - Graz, Áustria: Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 2022.

MARTINS, T. D. *et al.* Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. **Revista de Geomorfologia**, v. 19, p. 136-144, 2017.

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. Doutorado em Engenharia Geotécnica - São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographical control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.

NERY, T. D.; VIEIRA, B. C. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 74, n. 2, p. 369-378, 2015.

NICU, I. C.; ASANDULESEI, A. GIS-based evaluation of diagnostic areas in landslide susceptibility analysis of Bahluiet River Basin (Moldavian Plateau, NE Romania). Are Neolithic sites in danger? **Geomorphology**, v. 314, p. 27-41, 2018.

PERLA, R.; CHENG, T. T.; MCCLUNG, D. M. A Two-Parameter Model of Snow-Avalanche Motion. **Journal of Glaciology**, v. 26, n. 94, p. 197-207, 1980.

SOUSA, S. G. de *et al.* Suscetibilidade a Escorregamentos E Risco De Queda De Blocos No Geossítio Colina Do Horto, Juazeiro Do Norte/Ce. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 16, n. 2, p. 194-212, 2018.

UNESCO World Heritage Centre. **Climate change and World Heritage: Report on predicting and managing the impacts of climate change on World Heritage and Strategy to assist States Parties to implement appropriate management responses**. World Heritage Reports 22. Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2007.

VIEIRA, B. C. *et al.* Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 6, p. 1-15, 2018.

WICHMANN, V. The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) – a GIS-based simulation framework for gravitational processes. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 9, p. 3309-3327, 2017.

ZANIRATO, S. H.; RIBEIRO, W. C. Mudanças climáticas e risco ao patrimônio cultural em Ouro Preto – MG - Brasil. **Confins**, n. 21, p. 1-55, 2014.

ZWEIG, M. H.; CAMPBELL, G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. **Clinical Chemistry**, v. 39, n. 4, p. 561-577, 1993.