



Simulação Numérica de Infiltração em Talude da Formação Itapecuru durante Anos Relacionados ao ENOS com Base Em Dados de Satélite: Um Estudo Climático na Região Nordeste da Amazônia, Brasil.

Luiz Felipe Goulart Fiscina

Engenheiro Geotécnico, Doutorando, POLI-USP, São Paulo, Brasil, luizfiscina@usp.br

Felipe Santos de Almeida

Engenheiro Geotécnico, Doutorando, POLI-USP, São Paulo, Brasil, almeida.felipe@usp.br

Marcos Massao Futai

Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, futai@usp.br

RESUMO: Este estudo investiga a influência da variabilidade climática interanual, modulada pelos eventos El Niño–Oscilação Sul (ENSO), na estabilidade de taludes de corte em solos não saturados da Formação Itapecuru, situada na região nordeste da Amazônia brasileira. A análise concentra-se em um trecho da Estrada de Ferro Carajás (EFC), onde são recorrentes instabilidades durante a estação chuvosa. Para isso, adotou-se técnicas de modelagem numérica acoplada (SEEP/W e SLOPE/W) com dados orbitais de precipitação (CHIRPS) e umidade do solo (SMAP) para representar as condições hidrogeológicas reais entre 2011 e 2023. Taludes com 25° apresentaram $FS \geq 1,5$, enquanto inclinações de 30° a 40° apresentaram $FS \leq 1,5$ com valor mínimo de 1,01. A sucção matricial residual resultou em valores de coesão aparente de ~ 6 kPa, mesmo após eventos de chuva extrema. Eventos de La Niña resultaram nos menores FS, especialmente no início da estação chuvosa. Foram identificados limiares preliminares de chuva ($P99 \geq 49$ mm e acumulados em 120 h ≥ 124 mm) associados aos episódios de instabilidade, os quais podem servir como referência inicial para orientar inspeções geotécnicas e subsidiar o desenvolvimento futuro de protocolos de alerta específicos. Os resultados reforçam a eficácia da integração entre modelagem numérica e sensoriamento remoto para o planejamento preventivo de obras ferroviárias em regiões tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Solos Não Saturados, ENSO, Modelagem Numérica Acoplada e Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT: This study investigates the influence of interannual climate variability, modulated by El Niño–Southern Oscillation (ENSO) events, on the stability of unsaturated cut slopes developed in the Itapecuru Formation, located in the northeastern sector of the Brazilian Amazon. The analysis focuses on a segment of the Carajás Railway (EFC), where slope instabilities are recurrent during the rainy season. A coupled numerical modeling approach (SEEP/W and SLOPE/W) was adopted using satellite-derived precipitation (CHIRPS) and soil moisture (SMAP) data to represent actual hydrogeological conditions from 2011 to 2023. Slopes with 25° inclinations exhibited $FS \geq 1.5$, while inclinations between 30° and 40° reached $FS \leq 1.5$, with a minimum of 1.01. Residual matric suction contributed to apparent cohesion values of approximately 6 kPa, even following extreme rainfall events. La Niña years yielded the lowest FS values, particularly during the early rainy season. Preliminary rainfall thresholds (daily precipitation $\geq P99 = 49$ mm and 120-hour accumulations ≥ 124 mm) were identified in association with instability events and may serve as an initial reference to guide geotechnical inspections and support the future development of segment-specific early warning protocols. The results underscore the effectiveness of integrating numerical modeling and remote sensing for proactive planning and risk mitigation in tropical railway infrastructure.

KEYWORDS: Slope Stability, Unsaturated Soils, ENSO, Coupled Numerical Modeling and Remote Sensing.

1 INTRODUÇÃO

A crescente ocorrência de eventos extremos associados à variabilidade hidrológica tem intensificado os desafios de estabilidade em infraestruturas críticas, sobretudo em ambientes tropicais marcados por sazonalidade e alta variabilidade climática. A Estrada de Ferro Carajás (EFC), com 892 km entre a Serra dos Carajás (PA) e o Porto de São Luís (MA), atravessa o bioma Amazônico e está sujeita a riscos geotécnicos como erosões, subsidências e escorregamentos em taludes de corte e aterro (De Sousa, 2025). As ocorrências



2025

se concentram entre os km 200 e 433, em áreas com relevo dissecado, solos tropicais não saturados e litologias frágeis da Formação Itapecuru.

Essa formação é composta principalmente por arenitos avermelhados intercalados com siltitos e argilitos que, ao sofrerem intemperismo, originam camadas de solos residuais predominantemente arenosos (De Sousa, 2025). A maioria das instabilidades ocorre durante a estação chuvosa (dezembro a maio), com acumulados semestrais médios de 1.300 mm, destacando-se os meses de março e abril, que apresentam acumulados médios mensais de 300 mm. Esses valores evidenciam a influência direta da precipitação nos processos de movimento de massa dos taludes adjacentes à EFC (De Sousa, 2025). Essa vulnerabilidade é acentuada pela atuação do fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENSO): em anos sob influência de eventos do tipo La Niña, ocorre uma intensificação das chuvas na região (Nascimento et al., 2017). Em contraste, durante anos sob a influência de eventos El Niño, ocorre uma escassez de chuvas na região.

A análise da influência climática é dificultada pela escassez de dados pluviométricos contínuos na região Norte/Nordeste (Pereira Filho et al., 2018). Como alternativa, produtos orbitais como o CHIRPS têm sido eficazes na estimativa de precipitação em áreas remotas (Dos Santos Silva et al., 2023), enquanto dados de umidade do solo do SMAP permitem calibrar realisticamente modelos numéricos de infiltração (Koster et al., 2018), fundamentais para prever instabilidades em pacotes de solos não saturados (Rahardjo et al., 2012).

Diante disso, este estudo avalia a estabilidade de um talude típico da Formação Itapecuru, simulando diferentes inclinações (25° , 30° , 35° e 40°) sob distintos cenários de precipitação. As análises compararam anos sob condição neutra (2013), El Niño (2015) e La Niña (2022), com dados do CHIRPS e do SMAP. A partir de simulações calibradas com dados experimentais e climáticos, busca-se compreender a influência interanual da precipitação na estabilidade de taludes e identificar os limiares de chuva associados aos menores fatores de segurança. Os resultados contribuem para o entendimento dos mecanismos de instabilidade da Formação Itapecuru e para o planejamento preventivo em regiões sujeitas à variabilidade climática sazonal e interanual.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O presente estudo foi realizado em um trecho da Estrada de Ferro Carajás (EFC), localizado entre os quilômetros 370 e 411, inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Pindaré. Essa região apresenta condições geotécnicas e morfológicas particularmente favoráveis à ocorrência de instabilidades em taludes (De Sousa, 2025). O segmento analisado intercepta dois platôs distintos: o superior, com altitudes acima de 110 m, e o inferior, situado no nível da ferrovia, com cerca de 63 m. Esse desnível acentuado gera um gradiente hidráulico significativo, promovendo o escoamento superficial e subsuperficial em direção à ferrovia, sobretudo durante a estação chuvosa. Esse fluxo intensifica a infiltração nas superfícies de corte e contribui para a vazão do Rio Pindaré, localizado a jusante do talude.

A combinação entre relevo acidentado, drenagem natural e alta variabilidade sazonal de precipitação constitui um fator crítico para o comportamento hidromecânico dos solos residuais da região. A Figura 1 ilustra as características geomorfológicas típicas dessa região.



Figura 1. Características geomorfológicas dos taludes típicos presentes entre os quilômetros 370 e 411.



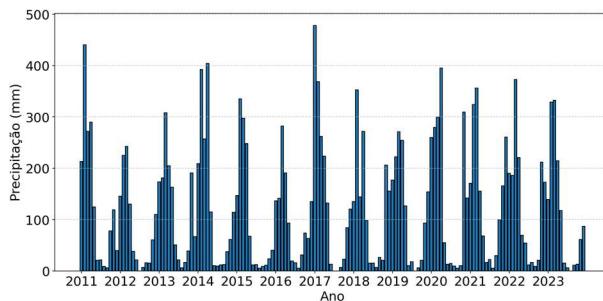
2025

2.2 Dados de Precipitação

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram obtidos do produto orbital CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data), amplamente aplicado em regiões com baixa densidade de estações pluviométricas (Dos Santos Silva et al., 2023). De acordo com esses autores, o CHIRPS fornece séries diárias com resolução espacial de 0,05° (~5 km) desde 1981. Para a análise local, foi extraída a série de 2011 a 2023 de um pixel representativo (Lat.: -4,38; Long.: -46,79), localizado nas proximidades do km 408 da ferrovia. A extração foi realizada por meio da plataforma Climate Engine (<https://www.climateengine.org/>), a qual permite consultar e baixar séries temporais baseadas em dados de sensoriamento remoto (Huntington et al., 2017). A Figura 2a apresenta os acumulados mensais desse ponto.

A influência do fenômeno ENSO foi avaliada com base no índice ONI (Oceanic Niño Index), que representa a média móvel trimestral da temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4 (5°N–5°S, 170°W–120°W). De acordo com a NOAA, valores de $ONI \geq +0,5^{\circ}\text{C}$ indicam ocorrência de El Niño, enquanto $ONI \leq -0,5^{\circ}\text{C}$ caracteriza La Niña (De Souza e Reboita, 2021). A Figura 2b apresenta os acumulados anuais de precipitação comparados ao ONI, evidenciando a relação entre o ENSO e a variabilidade climática na Bacia do Rio Pindaré. Entre 1990 e 2019, a média anual de precipitação foi de 1.463 mm (De Sousa, 2025). Em 2015 (El Niño, $ONI_{\text{médio_anual}} \approx 1,5$) foram registrados 1.207 mm; em 2021 (La Niña, $ONI_{\text{médio_anual}} \approx -0,7$), 1.673 mm; e em 2013 (condição neutra, $ONI_{\text{médio_anual}} \approx -0,29$), 1.421 mm, valores que destacam a sensibilidade do regime pluviométrico aos eventos ENSO. Os dados de ONI foram obtidos na plataforma da Universidade Federal de Itajubá — UNIFEI (<https://meteorologia.unifei.edu.br>).

a)



b)

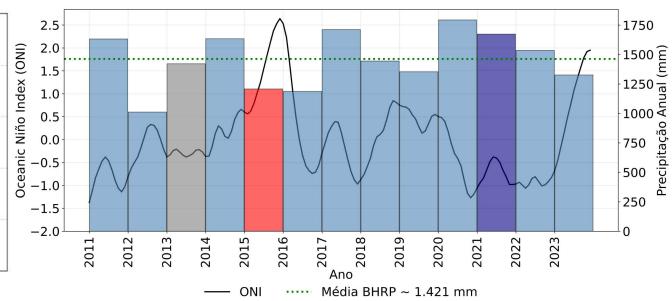


Figura 2. (a) Série temporal dos acumulados mensais de precipitação (2011–2023); (b) Acumulados anuais de precipitação (barras) e variação do índice ONI (linha preta) entre 2011 e 2023. A linha verde pontilhada indica a média histórica anual (~1.463 mm). Destaques: 2015 (vermelho, influência do El Niño), 2021 (azul, influência do La Niña) e 2013 (cinza, condição neutra).

Por fim, em relação aos eventos extremos de precipitação nessa localidade, a Tabela 1 apresenta os índices calculados para o período de 1981 a 2023. O valor do percentil 99 (p99) representa o limiar acima do qual se encontram os 1% maiores registros de precipitação diária ao longo da série temporal, considerando apenas os dias com precipitação igual ou superior a 1 mm. Já os valores para 24h_m, 48h_m, 72h_m, 96h_m e 120h_m correspondem às médias dos máximos acumulados ao longo da mesma série histórica. Em outras palavras, foram extraídas as máximas acumuladas de cada ano, e depois calculado a média desses valores.

Tabela 1. Índices de Precipitação Extrema (1981-2023).

Índice	Valor (mm)	Índice	Valor (mm)
P99	49	72h _m	94
24h _m	55	96h _m	109
48h _m	77	120h _m	124

2.3 Dados de Umidade do Solo

Para calibrar as condições iniciais do modelo de infiltração, foram utilizados dados de umidade do solo até 1 m de profundidade, obtidos do produto orbital SMAP L4 (Soil Moisture Active Passive), desenvolvido pela NASA (Koster et al., 2018). Este produto fornece estimativas globais de umidade volumétrica com resolução espacial de ~9 km e atualização diária desde março de 2015, por meio de sensores de micro-ondas

em banda L. Os dados foram extraídos da plataforma Earth Engine (<https://developers.google.com/earth-engine>) para o mesmo ponto geográfico citado anteriormente. Foram analisados os menores valores da série temporal completa de 2016 a 2023, adotando-se o valor mínimo como condição inicial de umidade do solo não saturado nas simulações. Essa escolha considera que o início da estação chuvosa tende a coincidir com o período de menor umidade no perfil, ao final da estação seca. Dessa forma, adotar esse valor como condição inicial permite representar de maneira mais realista o estado de sucção matricial máxima, que influencia diretamente a infiltração subsequente e o desenvolvimento de poropressões. Essa escolha também se alinha aos resultados dos ensaios realizados em campo durante a estação seca, quando se registraram baixos teores de umidade e níveis freáticos mais profundos ao longo dos taludes dessa região. Essa abordagem melhora a representatividade do estado hídrico inicial, essencial para o comportamento hidráulico e geotécnico dos solos (Figura 3). Adicionalmente, observa-se coerência entre os dados do SMAP com o regime pluviométrico extraído pelo CHIRPS, com elevações durante períodos chuvosos e reduções no período de estiagem, confirmando a sensibilidade do SMAP às variações sazonais de umidade.

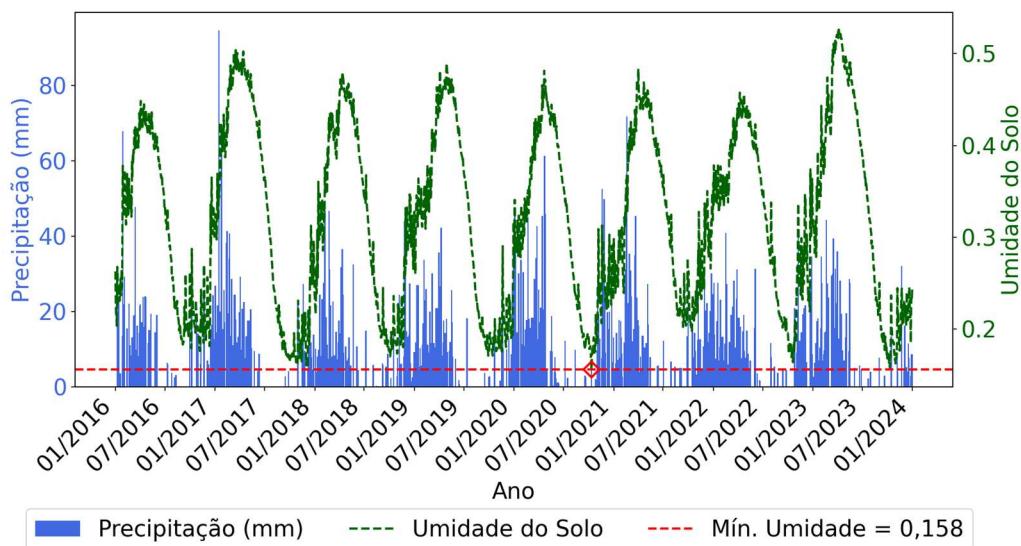


Figura 3. Variação temporal da precipitação diária e da umidade do solo entre 01/2016 e 12/2023.

2.4 Caracterização Hidro-Geotécnica da Formação Itapecuru e Modelagem Numérica

Com base em ensaios de campo e laboratório, foram definidos os parâmetros médios utilizados nas simulações de fluxo e estabilidade (Tabela 2), realizadas no software Geostudio 2023 (módulos Seep/W e Slope/W).

Tabela 2. Parâmetros Geotécnicos Médios.

Parâmetro	Valor	Tipo	Parâmetro	Valor	Tipo
W_{nat} (%)	7,1	Teor de Umidade Natural	K_{sat} (m/s)	4,20E-06	Coeficiente de Permeabilidade Saturado
γ_{nat} (kN/m³)	18,8	Peso Específico Natural	LL	22	Límite de Liquidez
γ_s (kN/m³)	26,9	Peso Específico dos Sólidos	LP	15	Límite de Plasticidade
γ_d (kN/m³)	17,6	Peso Específico Seco	IP	7	Índice de Plasticidade
γ_{sat} (kN/m³)	21	Peso Específico Saturado	SUCS	SC-SM	Classificação Unificada
e	0,53	Índice de Vazios	c (kPa)	62,4	Coesão Aparente (Triaxial CID - natural)
S_{nat} (%)	36	Grau de Saturação (Natural)	c' (kPa)	0	Coesão Efetiva (CIU - saturado)
w_{sat} (%)	19,3	Teor de Umidade Saturado	Φ'	36,5°	Ângulo de Atrito Efetivo (CIU - saturado)

A curva de retenção de água do solo foi ajustada com dados dos ensaios de papel filtro (FP), HYPROP-2 e WP4C. A Figura 4a mostra o ajuste pelo modelo bimodal de Van Genuchten (Seki et al., 2022). A curva de condutividade hidráulica foi estimada com base em Fredlund et al. (1994), utilizando o valor de K_{sat} como ponto inicial (Figura 4b). É possível observar também na Figura 4b a sucção máxima ($\psi_{máx}$) e a condutividade hidráulica não saturada ($K_{mín}$) associadas à umidade mínima (θ_{min_SMAP}) identificada em campo com os dados



do SMAP. Esses três parâmetros (ψ_{\max} , K_{\min} e θ_{\min_SMAP}) foram utilizados para delinear as condições iniciais do modelo de infiltração.

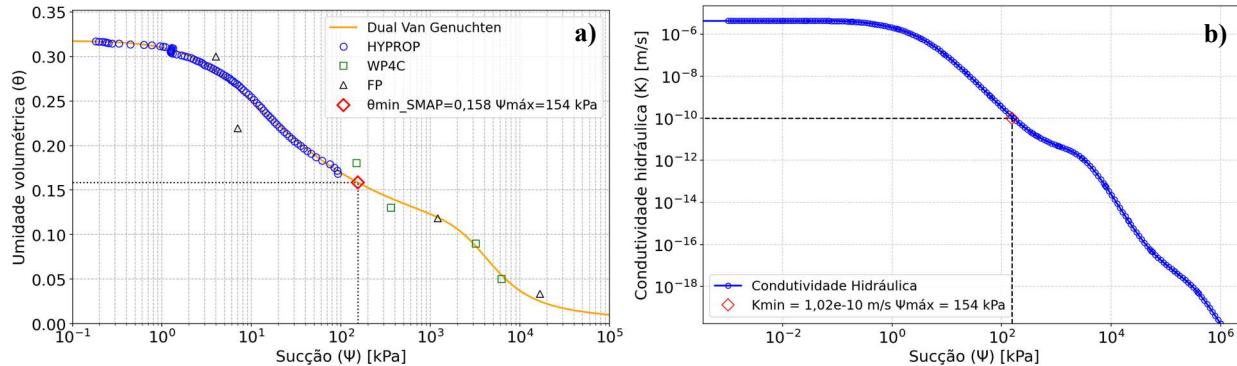


Figura 4. (a) Curva de retenção de água (SWCC); (b) Curva de condutividade hidráulica.

Para a análise de estabilidade, foi considerada a variação da resistência ao cisalhamento em função da sucção matricial, conforme proposto por Vanapalli et al. (1996), que integra os parâmetros c' e Φ' com a SWCC. A Figura 5a ilustra o aumento da resistência aparente com a sucção, destacando o valor próximo ao obtido no triaxial drenado com umidade natural ($c' \approx 62$ kPa), com a coesão aparente estimada por Vanepalli et al. (1996): $c' \approx 57$ kPa.

A estabilidade global foi avaliada por meio de modelagem numérica acoplada com o auxílio dos módulos SEEP/W e SLOPE/W do GeoStudio. A simulação de infiltração transiente (SEEP/W) considerou a precipitação diária de 2011 a 2023 para estimar a variação temporal das poropressões. A Figura 5b resume as principais características do modelo. As condições de contorno foram definidas com base em dados de campo, satélite e laboratório, considerando a sazonalidade climática. O estado inicial foi definido pela sucção máxima observada ao fim da estação seca, com a condutividade hidráulica não saturada correspondente. Finalmente, com os resultados da infiltração, realizaram-se análises de estabilidade (SLOPE/W) via equilíbrio limite, pelo método de Morgenstern e Price. A superfície crítica de ruptura foi identificada por busca entre pontos de entrada e saída, abrangendo diferentes geometrias representativas do talude.

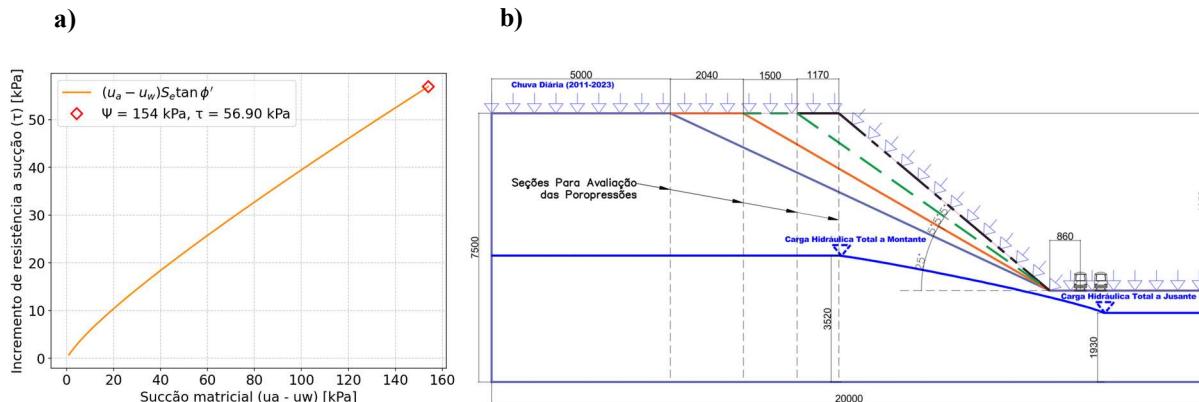


Figura 5. (a) Ganhos de resistência à sucção com o aumento da sucção matricial; (b) Características Gerais do Modelo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Variação do FS ao Longo da Série Temporal

A Figura 6 mostra a variação do FS de 2011 a 2023 para as quatro inclinações analisadas. A Tabela 3 apresenta os valores de FS sob saturação total ($c' = 0$ kPa; $\Phi' = 36,5^\circ$), servindo como cenário de referência.

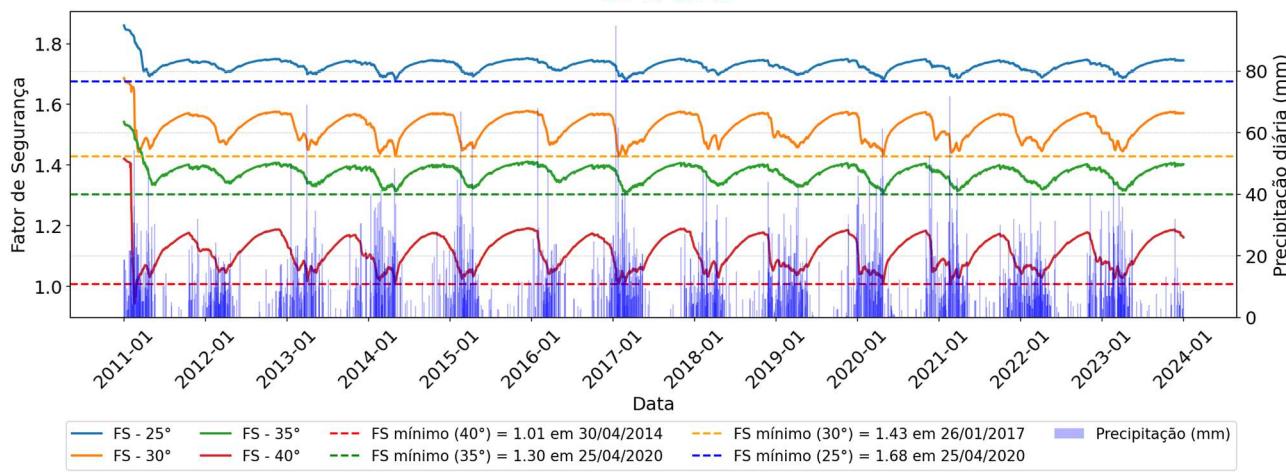


Figura 6. Variação do FS ao longo da série temporal (2011/2023) para diferentes inclinações.

Tabela 3. FS críticos para simulações com solo saturado.

Parâmetro	Valor (mm)	Parâmetro	Valor (mm)
FS-25 _s	1,62	FS-35 _s	1,16
FS-30 _s	1,29	FS-40 _s	0,9

Como o modelo exigiu cerca de 180 passos para estabilização, as análises consideraram dados a partir de 01/01/2012. Apenas para a inclinação de 40°, o FS atingiu valor próximo à ruptura (FS_{mín} = 1,01 em 30/04/2014). Para a inclinação de 35°, o FS mínimo foi 1,30 (25/04/2020), enquanto para 30° foi de 1,43 (26/01/2017); ambos abaixo do valor de referência da NBR 11682 (FS ≥ 1,5), embora sem atingir ruptura. No caso do talude com inclinação de 25°, o valor mínimo foi 1,68 (25/04/2020), mantendo-se acima do limite normativo.

De modo geral, os valores de FS considerando a sucção foram superiores aos do solo saturado (Tabela 3), indicando a contribuição da coesão aparente gerada pela sucção matricial, mesmo após eventos chuvosos (incluindo eventos extremos típicos da região). Em média, a sucção residual nas seções indicadas na Figura 5b (Item 2.4), nos dias críticos (valores de FS mínimo), variou entre -6 e -15 kPa ($\psi_{média} \approx -11$ kPa). Segundo o modelo de Vanapalli et al. (1996), esse valor corresponde a uma coesão aparente residual de aproximadamente 6 kPa, contribuindo para a estabilidade do maciço em condições não saturadas.

3.2 FS Mínimo Mensal nos Anos de 2013, 2015 e 2022.

A Figura 7 apresenta os fatores de segurança mínimos mensais nos anos sob influência do ENSO e em um ano de condição climática neutra, para diferentes inclinações. De modo geral, observa-se que os anos com ocorrência de La Niña apresentaram menores fatores de segurança durante o período chuvoso (dezembro a maio), enquanto os anos com El Niño resultaram em fatores de segurança mais elevados no período seco. Destaca-se ainda que, nos quatro primeiros meses da estação chuvosa (dezembro a março), os efeitos do fenômeno La Niña na redução do FS foram mais pronunciados, embora com variações sutis na segunda casa decimal do FS. Considerando que há um intervalo de resposta entre o sinal do ENSO e seus efeitos pluviométricos na região, geralmente entre 3 e 5 meses (Zeng, 1999), tais resultados oferecem uma janela de tempo estratégica para a adoção de medidas preventivas. Entre essas ações, destacam-se a manutenção e/ou instalação de sistemas de drenagem superficial e profunda (DHPS), que podem mitigar os efeitos do aumento da umidade no solo e contribuir para a estabilidade dos taludes ao longo da ferrovia.

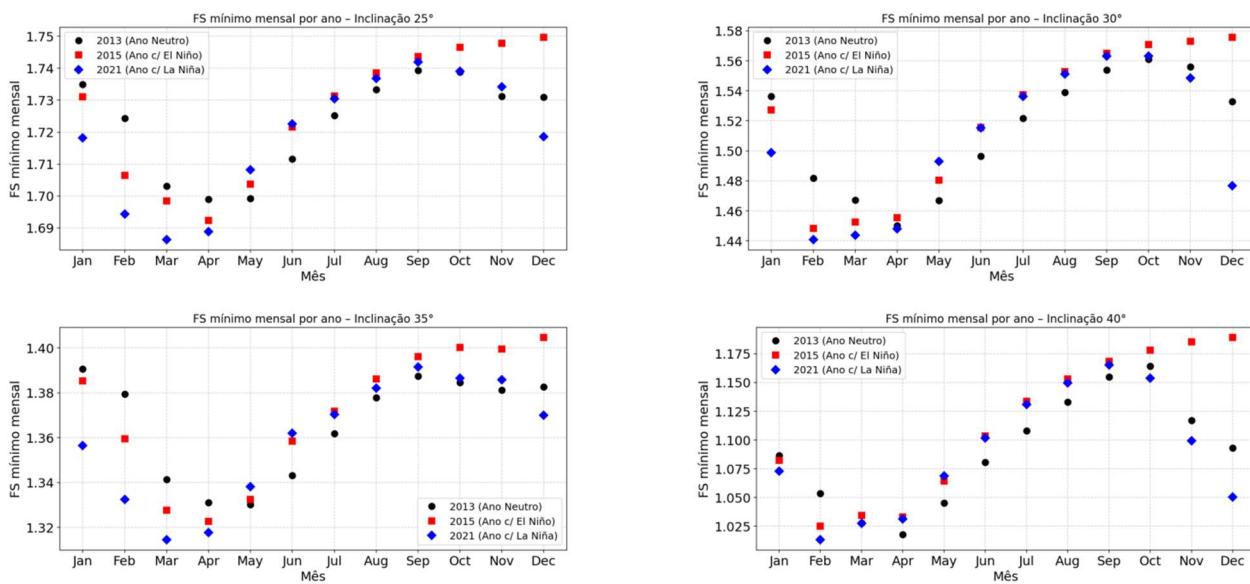


Figura 7. Fatores de segurança mínimos mensais nos anos com fenômenos ENSO e no ano neutro para a diferentes inclinações.

3.3 Limiares de Chuva.

A Tabela 4 apresenta os valores de precipitação registrados durante os eventos em que se verificou o menor Fator de Segurança (FS) nos taludes estudados, bem como os acumulados correspondentes de até quatro dias anteriores ao dia de menor FS. A análise desses dados revela a recorrência de dois padrões críticos de precipitação associados à uma redução significativa do FS: (i) a ocorrência de pelo menos um dia com precipitação diária igual ou superior ao percentil 99 da série histórica ($P99 = 49 \text{ mm}$), e (ii) o acúmulo total de precipitação em 120 horas igual ou superior à média dos máximos históricos de cinco dias ($120h_{\max} = 124 \text{ mm}$), registrados para o período de 1981 a 2023 (Ver Tabela 1 – Item 2.2).

Esses dois critérios foram observados simultaneamente nos três eventos analisados, o que reforça a hipótese de que chuvas extremas, particularmente quando distribuídas ao longo de cinco dias consecutivos, atuam como gatilhos para processos de instabilização, especialmente em taludes com inclinação superior a 35° sobre solos da Formação Itapecuru.

Dessa forma, os limiares de precipitação identificados neste estudo podem servir como referência preliminar para nortear inspeções geotécnicas em trechos suscetíveis, especialmente aqueles com inclinações superiores a 35° . Recomenda-se, contudo, cautela na aplicação direta desses valores como critérios de acionamento de alertas operacionais, uma vez que se trata de uma análise inicial, restrita a um segmento representativo da ferrovia. Estudos adicionais são necessários para expandir a base de dados, refinar a caracterização hidro-geotécnica dos diferentes setores da EFC e, assim, calibrar limiares específicos para cada trecho, considerando variações geomorfológicas, litológicas e hidrológicas locais. Nesse contexto, a integração futura de monitoramento em tempo real, campanhas de instrumentação e modelos de previsão poderá consolidar protocolos de alerta mais robustos e ajustados à realidade de operação da ferrovia.

Vale destacar que, nos eventos analisados, os fatores de segurança mínimos nem sempre coincidiram com o dia de maior precipitação, mas sim com momentos posteriores, em que a infiltração acumulada reduziu progressivamente a sucção matricial e elevou as poropressões na zona de ruptura. Esse comportamento é típico de solos não saturados, sobretudo em materiais com baixa capacidade de retenção, como os arenosos da Formação Itapecuru, e reforça a importância de considerar os efeitos transientes da chuva e o acúmulo de umidade no perfil ao longo de vários dias. Observações similares foram relatadas por Rahardjo et al. (2001), que demonstraram, por meio de modelagem numérica, que o fator de segurança pode atingir seu valor mínimo após o fim da chuva intensa, impulsorado pelo efeito combinado da chuva antecedente e da redistribuição da água no solo.



Tabela 4. Valores de Precipitação Diária e Acumulados Durante os Eventos de FS mínimo.

Inclinação	Data	Precipitação (mm)	Acumulado (mm)	Acumulado (horas)
40°	30/04/2014*	0	0	24h
	29/04/2014	25	25	48h
	28/04/2014	25	50	72h
	27/04/2014	49	99	96h
	26/04/2014	25	124	120h
35° e 25°	25/04/2020*	0	0	24h
	24/04/2020	46	46	48h
	23/04/2020	0	46	72h
	22/04/2020	62	108	96h
	21/04/2020	31	139	120h
30°	26/01/2017*	8	8	24h
	25/01/2017	21	29	48h
	24/01/2017	62	91	72h
	23/01/2017	31	122	96h
	22/01/2017	11	133	120h

* Dia do evento que levou ao FS mínimo.

4 CONCLUSÕES

A modelagem numérica acoplada, utilizando os módulos SEEP/W e SLOPE/W, mostrou-se eficaz para avaliar o desempenho de taludes de corte não saturados da Formação Itapecuru sob diferentes cenários de precipitação associados ao fenômeno ENSO, empregando dados orbitais do CHIRPS e do SMAP como fontes confiáveis para representar as condições climáticas e de umidade do solo.

Os resultados indicaram que taludes com inclinações de 25° e 30° mantiveram-se estáveis ao longo do período analisado (2011–2023), enquanto taludes com 35° apresentaram fatores de segurança (FS) abaixo do valor de referência da NBR 11682 (FS < 1,5). Já os taludes com 40° atingiram condição crítica (FS ≈ 1,01), evidenciando alto risco de instabilização.

A succão matricial residual do solo não saturado resultou em uma coesão aparente estimada em aproximadamente 6 kPa, mesmo após eventos pluviométricos intensos. Tal valor pode ser utilizado como referência para projetos futuros, embora com cautela. Recomenda-se que simulações com séries históricas mais extensas sejam realizadas para avaliar a possibilidade de redução ou anulação dessa coesão.

A variabilidade interanual da precipitação, modulada pelo ENSO, influenciou diretamente os fatores de segurança. Os menores valores foram observados durante eventos de La Niña, especialmente no início da estação chuvosa, o que sugere que esse período constitui uma janela crítica para monitoramento e implementação de medidas preventivas.

Foram identificados limiares pluviométricos críticos que antecederam os episódios de menor FS, sugerindo que a combinação de chuvas diárias extremas ($\geq P99 = 49$ mm) e acumulados de 120 horas (≥ 124 mm), em taludes com inclinações superiores a 35°, pode estar associada a condições de maior vulnerabilidade. No entanto, destaca-se que tais valores devem ser interpretados como referências preliminares, úteis para orientar inspeções e ações de manutenção preventiva de forma exploratória. Recomenda-se que futuras pesquisas ampliem a base de dados, contemplem a variação geológica e geomorfológica ao longo de toda a ferrovia e promovam a validação desses limiares para subsidiar a definição de protocolos de alerta mais robustos e ajustados a cada segmento operacional.

O estudo reforça a importância da integração entre dados orbitais, modelagem numérica e conhecimento geotécnico local para o manejo de riscos em obras lineares inseridas em ambientes tropicais com elevada variabilidade climática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Pesquisa GeoinfraUSP, à Cátedra Under Rail - VALE e à CAPES.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: Estabilidade de encostas. ABNT, Rio de Janeiro.
- De Sousa, M. T. R., Silva, F. P., Fiscina, L. F. G., Cordeiro, W. B., & Futai, M. M. (2025). Analysis of land use and coverage and its relationships with slope instability events on the Carajás Railway: The case of the Pindaré River Basin in the Brazilian Amazon biome. *Journal of South American Earth Sciences*, 154, 105373.
- De Souza, C. A., & Reboita, M. S. (2021). Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. *Terrae Didatica*, 17, e021009.
- Dos Santos Silva, F. D., da Costa, C. P. W., dos Santos Franco, V., Gomes, H. B., da Silva, M. C. L., dos Santos Vanderlei, M. H. G., ... & da Silva Ferreira, D. B. (2023). Intercomparison of different sources of precipitation data in the Brazilian Legal Amazon. *Climate*, 11(12), 241.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533–546.
- Huntington, J., Hegewisch, K., Daudert, B., Morton, C., Abatzoglou, J., McEvoy, D., & Erickson, T. (2017). Climate Engine: Cloud computing of climate and remote sensing data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1675–1680.
- Koster, R. D., Liu, Q., Mahanama, S. P., & Reichle, R. H. (2018). Improved hydrological simulation using SMAP data: Relative impacts of model calibration and data assimilation. *Journal of Hydrometeorology*, 19(4), 727–741.
- Nascimento, F. D. C. A. D., Braga, C. C., & Araújo, F. R. D. C. D. (2017). Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 375–386.
- Pereira Filho, A. J., Vernado, F., Vernado, G., Gomes Vieira Reis, F. A., Giordano, L. D. C., Cerri, R. I., ... & Amaral, C. D. S. (2018). A step towards integrating CMORPH precipitation estimation with rain gauge measurements. *Advances in Meteorology*, 2018, 2095304.
- Rahardjo, H., Li, X. W., Toll, D. G., & Leong, E. C. (2001). The effect of antecedent rainfall on slope stability. *Geotechnical & Geological Engineering*, 19(3), 371–399.
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Leong, E. C. (2012). Unsaturated soil mechanics for slope stabilization. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 43(1), 48–58.
- Seki, K., Toride, N., & van Genuchten, M. Th. (2022). Closed-form hydraulic conductivity equations for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. *Vadose Zone Journal*, 21(1), e20168.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392.
- Zeng, N. (1999). Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, 104(D8), 9097–9106.